

**TUGAS AKHIR - TM141585**

**ANALISA STRUKTUR STATIS PADA *CARBODY*  
KERETA LRT PALEMBANG DENGAN  
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**EGY MEIRARIZKA NURFADILLAH**  
NRP. 02111440000123

**Dosen Pembimbing**  
**ACHMAD SYAIFUDIN, S.T., M.Eng., Ph.D.**

**Departemen Teknik Mesin**  
**Fakultas Teknologi Industri**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2018**





**TUGAS AKHIR - TM141585**

**ANALISA STRUKTUR STATIS PADA *CARBODY*  
KERETA LRT PALEMBANG DENGAN  
MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**EGY MEIRARIZKA NURFADILLAH**  
NRP. 02111440000123

**Dosen Pembimbing**  
**ACHMAD SYAIFUDIN, S.T., M.Eng., Ph.D.**

**Departemen Teknik Mesin**  
**Fakultas Teknologi Industri**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2018**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*





**FINAL PROJECT - TM141585**

# ***STATIC STRUCTURAL ANALYSIS ON LRT CARBODY USING FINITE ELEMENT METHOD***

**EGY MEIRARIZKA NURFADILLAH**  
**NRP. 02111440000123**

*Supervisor*

**ACHMAD SYAIFUDIN, S.T., M.Eng., Ph.D.**

*Department of Mechanical Engineering*  
*Faculty Of Industrial Technology*  
*Sepuluh Nopember Institute Of Technology*  
**Surabaya 2018**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# **ANALISIS STRUKTUR STATIS PADA *CARBODY* KERETA LRT PALEMBANG DENGAN MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

## **TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**EGY MEIRARIZKA NURFADILLAH**

NRP. 02111440000123

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Achmad Syaifudin, S.T, M.Eng., Ph.D (Pembimbing)  
NIP. 197909262005011001
2. Ir. Julendra B. Ariatedja, M.T. ..... (Penguji I)  
NIP. 196807061999031004
3. Ari Kurniawan Saputra, ST, MT (Penguji II)  
NIP. 198604012015041001

**SURABAYA**

**JULI, 2018**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*

# **ANALISIS STRUKTUR STATIS PADA *CARBODY* KERETA LRT PALEMBANG DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**Nama Mahasiswa** : Egy Meirarizka Nurfadillah  
**NRP** : 02111440000123  
**Jurusan** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Achmad Syaifudin,S.T,M.Eng,Ph.D.

## **ABSTRAK**

*Carbody* merupakan bangun ruang yang berisi penumpang dan barang yang dibangun dengan kontruksi rangka seperti plat dan sebagai komponen penting dalam sarana transportasi berbasis rel. Sesuai dengan fungsinya, Untuk menjaga keamanan dan keutuhan barang serta menjaga keamanan dan kenyamanan penumpang selama perjalanan hingga berhenti di tempat tujuan, diperlukan suatu analisis mengenai keamanan sebuah sarana transportasi dari kontruksi *Carbody*.

Meskipun kontruksi *Carbody* kereta LRT Palembang telah selesai di manufaktur, penelitian ini tetap dilanjutkan sebagai acuan dalam merancang kontruksi *Carbody* kereta LRT kedepannya. Material Al 6061-T6 yang merupakan material kontruksi untuk pesawat terbang cenderung lebih kaku jika diaplikasikan pada kontruksi *carbody* kereta LRT Palembang, sehingga akan digantikan menjadi material Al 6005A-T6. Untuk memastikan material Al 6005A-T6 aman digunakan pada kontruksi *carbody* kereta LRT Palembang perlu dilakukannya analisis statik struktural dengan perhitungan metode elemen hingga untuk mengetahui nilai angka keamanan dari material tersebut. Analisis struktur ini menggunakan metode elemen hingga dengan fokus meninjau aspek deformasi total dan tegangan von mises. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench 18.0. Model *Carbody* LRT pada penelitian ini disederhanakan dengan menghilangkan *fillet* pada komponen tertentu, dan mereduksi model menjadi setengah bagian utama *Carbody*, sehingga pada proses simulasi ditambahkan *symmetry*

*region*. Simulasi *static structural* dilakukan pada model *Carbody* LRT Palembang dengan 4 variasi kasus pembebanan statik. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk deformasi total dan tegangan von mises. Hasil tersebut akan dibandingkan sesuai dengan standarisasi BS EN-12663-1:2010, dan standarisasi PM 175 Tahun 2015 sebagai tahap dalam proses verifikasi.

Hasil dari penelitian ini menyatakan bahwa angka keamanan kontruksi *carbody* kereta LRT bernilai 3.24 dengan meninjau analisis tegangan ekuivalen *von mises* maksimum. Nilai tegangan ekuivalen *von mises* maksimum sebesar 109.51 MPa yang terkonsentrasi pada sudut balok penyangga (material SPA-H JIS G3125) dengan persentase terhadap tegangan mulur bahan (355 MPa) sebesar 30.85% dapat dinyatakan aman karena nilai persentase berada dibawah nilai 75% sesuai dengan standarisasi PM 175 Tahun 2015. Nilai deformasi total maksimum sebesar 3.9546 mm (jika menggunakan material Al 6061-T6) dan 4.5187 mm (jika menggunakan material Al 6061-T6) terjadi pada komponen *underframe* dapat dinyatakan aman karena nilai deformasi total lebih kecil dari 0.375 in atau 9.525 mm sesuai dengan laporan perancangan LRT yang dibuat oleh *Central Corridor Light Rail Transit* pada tahun 2008. Material Al 6061-T6 dengan angka faktor keamanan 11.83 (dari hasil analisis tegangan *von mises* maksimum) dikategorikan sangat aman, sehingga lebih baik diganti oleh material Al 6005A-T6 dengan angka faktor keamanan 8.19 (dari hasil analisis tegangan *von mises* maksimum), dikarenakan dengan material Al 6005A-T6 sudah dikategorikan aman jika digunakan pada kontruksi *carbody* kereta LRT.

Kata kunci: *Carbody*, Deformasi Total, Tegangan Ekuivalen Von Misses, *Static Structural*, Metode Elemen Hingga.

# **STATIC STRUCTURAL ANALYSIS ON LRT CARBODY USING FINITE ELEMENT METHOD**

**Name** : Egy Meirarizka Nurfadillah  
**NRP** : 02111440000123  
**Department** : *Mechanical Engineering- ITS*  
**Academic Supervisor** : Achmad Syaifudin, S.T,M. Eng,Ph.D

## **ABSTRACT**

*Carbody is a wake up space that contains passengers and goods built with frame construction such as plate and as an important component in rail-based transportation. In accordance with its function, To maintain the security and integrity of goods and maintain the security and comfort of the passengers during the trip to stop at the destination, an analysis is required of the safety of a means of transportation from Carbody's construction.*

*Although the construction of the LRT Palembang train has been completed in manufacturing, the research continues as a reference in designing the future LRT Carbody train construction. Material Al 6061-T6 which is the construction material for aircraft tends to be more rigid if applied to the construction carbody Train LRT Palembang, so it will be replaced to material Al 6005A-T6. To ensure the material of Al 6005A-T6 safe to use on construction carbody Train LRT Palembang need to do analysis of structural static with calculation of finite element method to know value of safety factor number of material. This structural analysis uses finite element method with focus on reviewing the aspect of total deformation and equivalent stress von misses. This research uses ANSYS Workbench 18.0 software. The Carbody LRT model in this study is simplified by eliminating the fillets of certain components, and reducing the model to the main half of the Carbody, so in the simulation process the symmetry region is added. Static*

*structural simulation is done on Carbody LRT Palembang model with 4 variation of static loading case. The simulation results are shown in the form of total deformation and von mises voltage. The results will be compared in accordance with BS EN-12663-1: 2010 standardization, and standardization PM 175 of 2015 as a stage in the verification process.*

*The results of this study indicate that the carbody LRT construction value is 3.42 by analysis of the maximum equivalent stress von misses. The maximum equivalent stress von misses value of 109.51 MPa concentrated on the angle of the buffer beam (SPA-H JIS G3125 material) with the percentage of 30.85% (355 MPa) yield strength material (355 MPa) can be declared safe because the percentage value is below 75% in accordance with the PM 175 standardization in 2015. The maximum total deformation value of 3.9546 mm (if using material Al 6061-T6) and 4,5187 mm (if using material Al 6061-T6) occurs on the underframe component can be declared safe because the total deformation value is less than 0.375 in or 9,525 mm in accordance with the LRT design report prepared by Central Corridor Light Rail Transit in 2008. Material Al 6061-T6 with the safety factor number 11.83 (from maximum equivalent stress von misses analysis results) is categorized as very safe, so it is better to be replaced by Al 6005A-T6 material with a safety factor number 8.19 (from maximum equivalent stress von misses analysis results) the material of Al 6005A-T6 is categorized as safe when used on construction of LRT carbody.*

**Keywords:** *Carbody, Total Deformation, Equivalent Stress Von-Misses, Static Structural, Finite Element Method.*



## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya, tidak lupa shalawat serta salam penulis panjatkan kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis diberi kesempatan untuk menyelesaikan Tugas Akhir. Tugas Akhir ditujukan untuk memenuhi mata kuliah wajib yang harus diambil oleh mahasiswa Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), penulis telah menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “**Analisis Struktur Statis pada *Carbody* Kereta LRT Palembang dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga**”. Penulis ingin berterima kasih juga kepada :

1. Allah SWT atas karunia, rahmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan lancar.
2. Ayahanda Junarman, Ibunda Oti Rochmaeti, Adik Veira Dwi Novrima, Adik Imeltri Nur Afifah tercinta dan Keluarga yang senantiasa memberi dukungan dan doa hingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Achmad Syaifudin, S.T, M.Eng, Ph.D. , selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis. Terima kasih atas kesabarannya selama membimbing penulis.
4. Bapak Dr.Ir. Julendra B. Ariatedja, M.T., Bapak Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T., selaku dosen penguji tugas akhir penulis, terima kasih telah meluangkan waktunya dan atas saran-saran yang telah diberikan.
5. Bapak Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME. selaku Dosen wali penulis, terima kasih telah menjadi dosen wali saat perwalian satu kali tiap semester.
6. Teruntuk Martiana Nugraeny, terima kasih atas doa, perhatian, dukungan, dan motivasi dalam penyelesaian tugas akhir ini.

7. Rekan satu tim perjuangan tugas akhir penulis Rifai, Windhu, Reyhan, Kelvin, Betti, Kukuh, Mas Andhika, Mas Alkalifa dan kawan lainnya dalam susah senang menyelesaikan tugas akhir bersama.
8. Keluarga M57 yang banyak memberikan saya pengalaman berharga selama di Departemen Teknik Mesin.
9. Teman ITS Team Sapuangin atas bantuan dan semangatnya dalam pengerjaan dan penulisan Tugas Akhir
10. Sahabat laboratorium Rekayasa Termal dan Mekanika Benda Padat yang memberikan semangat penulis.
11. Seluruh civitas akademika Teknik Mesin ITS yang Baik dan Ramah.
12. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, 23 Juli 2018

**Penulis**

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xxi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Ruang Lingkup.....	2
1.3.1 Variabel yang diteliti.....	2
1.3.2 Variabel yang diabaikan.....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
2.1 Penelitian Terdahulu .....	5
2.2 <i>Carbody</i> .....	9
2.3 Spesifikasi Teknis Kereta LRT Palembang .....	10
2.4 Metode Elemen Hingga.....	11
2.4.1 Konsep Dasar Metode Elemen Hingga .....	11
2.4.2 Prosedur Metode Elemen Hingga dengan Menggunakan <i>Software</i> .....	11
2.4.3 Elemen <i>Shell</i> .....	13
2.5 Standarisasi .....	14
2.5.1 Standarisasi EN-12663-1:2010 .....	14
2.5.2 Standarisasi PM 175 Tahun 2015 .....	17
2.5.3 Standarisasi Defleksi.....	18

2.6	Konsep Tegangan dan Regangan.....	18
2.6.1	Konsep Tegangan .....	18
2.6.2	Konsep Regangan .....	20
2.6.3	Hubungan Tegangan dan Regangan .....	20
2.7	Analisis yang Digunakan .....	21
2.7.1	Analisis Deformasi Total.....	21
2.7.2	Analisis Kegagalan Teori Tegangan Von-Mises ..	22
2.7.3	Konsentrasi Tegangan .....	24
2.8	Perbandingan Al 6061-T6 dengan Al 6005A-T6 .....	24
<b>BAB III</b>	<b>METODE PENELITIAN.....</b>	<b>29</b>
3.1	Model Material .....	32
3.2	Pembuatan Solid Model.....	38
3.3	Model Elemen Hingga .....	32
3.3.1	Model <i>Carbody</i> Kereta LRT.....	41
3.3.2	<i>Symmetry Region</i> .....	42
3.3.3	<i>Bounded Connection</i> .....	43
3.3.4	Diskritisasi .....	44
3.4	Kondisi Batas dan Pembebanan.....	51
3.5	Tipe Analisis dan Kontrol Solusi.....	66
3.5.1	Analisis Deformasi Total.....	66
3.5.2	Analisis Tegangan <i>Von-Mises</i> .....	66
3.5.3	Analisis Penentuan Faktor Koreksi Tegangan Konsentrasi .....	66
3.5.4	Tahap Verifikasi .....	71
<b>BAB IV</b>	<b>HASIL DAN ANALISIS.....</b>	<b>30</b>
4.1	Hasil Analisis Tegangan Von-Mises Maksimum .....	75
4.1.1	Material Al 6061-T6.....	75
4.1.2	Material Al 6005A-T6 .....	80
4.1.3	Material SPA-H (JIS G 3125).....	85
4.2	Hasil Analisis Deformasi Total Maksimum.....	90
4.2.1	Material Al 6061-T6.....	90

4.2.2 Material Al 6005A-T6.....	93
4.2.3 Material SPA-H JIS (G 3125) .....	96
4.3 Pembahasan.....	98
4.3.1 Pembahasan Analisis Tegangan Von Mises	
Maksimum .....	98
4.3.2 Pembahasan Analisis Deformasi Total	
Maksimum .....	104
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	109
5.1 Kesimpulan.....	109
5.2 Saran .....	111
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	xxiii
<b>LAMPIRAN</b> .....	xxv
Lampiran 1. Data Ketebalan Komponen Carbody .....	xxv
Lampiran 2. Data Ketebalan Komponen Carbody yang diberikan pada Element Shell .....	xxx
Lampiran 3. Data Hasil Simulasi untuk Analisis Mesh Convergent Test .....	xlili
Lampiran 4. Detail Meshing pada setiap Komponen Utama.....	li
Lampiran 5. Data Berat Badan Rata-Rata Orang Asia.....	lvi
Lampiran 6. Detail Pembebanan .....	lvi
Lampiran 7. Data Hasil Simulasi Model Underframe dengan Fillet .....	lviii
Lampiran 8. Data Hasil Simulasi Model Underframe tanpa Fillet .....	lxi
Lampiran 9. Perbandingan 3D Model Belete Jirru dengan Penulis.....	lxiv
Lampiran 10. Kondisi Batas dan Pembebanan.....	lxv
Lampiran 11. Mesh Convergent Test pada Tahap Verifikasi Model Belete Jirru .....	lxvii
Lampiran 12. Hasil Meshing pada Model Belete Jirru.....	lxviii

Lampiran 13. Perbandingan Hasil Perhitungan Metode Elemen Hingga .....	lxix
Lampiran 14. Hasil Tegangan Von Mises Maksimum pada Material Al 6061-T6 .....	lxxi
Lampiran 15. Hasil Tegangan Von Mises Maksimum pada Material Al 6005A-T6.....	lxxv
Lampiran 16. Hasil Tegangan Von Mises Maksimum pada Material SPA-H.....	lxxix
Lampiran 17. Hasil Deformasi Total Maksimum pada Material Al 6061-T6.....	lxxxiii
Lampiran 18. Hasil Deformasi Total Maksimum pada Komponen Roof.....	lxxxiv
Lampiran 19. Hasil Deformasi Total Maksimum pada Material Al 6005A-T6 .....	lxxxv
Lampiran 20. Hasil Deformasi Total Maksimum pada Komponen Roof.....	lxxxvii
Lampiran 21. Hasil Deformasi Arah terhadap Sumbu X Maksimum .....	lxxxviii
<b>BIODATA PENULIS .....</b>	<b>xciii</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1. 1</b>	Kontruksi <i>Carbody</i> .....	1
<b>Gambar 2. 1</b>	Hasil simulasi tegangan pada <i>carbody</i> .....	6
<b>Gambar 2. 2</b>	Grafik perbandingan hasil <i>Finite Element</i> dan hasil eksperimen .....	7
<b>Gambar 2. 3</b>	Hasil analisa.....	8
<b>Gambar 2. 4</b>	Bagian-bagian utama pada <i>Carbody</i> .....	9
<b>Gambar 2. 5</b>	Elemen <i>Shell</i> .....	13
<b>Gambar 2. 6</b>	Komponen Tegangan.....	19
<b>Gambar 2. 7</b>	Perubahan Bentuk karena Beban Tarik .....	20
<b>Gambar 2. 8</b>	Kurva Tegangan dan Regangan.....	21
<b>Gambar 2. 9</b>	Arah tegangan pada kubus.....	22
<b>Gambar 2. 10</b>	Perbandingan Nilai Properties Material Al 6061-T6 dengan Al 6005A-T6.....	26
<b>Gambar 2. 11</b>	Aluminium Ekstrusi untuk Kontruksi <i>Carbody</i> .....	27
<b>Gambar 3. 1</b>	<i>Flowchart</i> Penelitian.....	31
<b>Gambar 3. 2</b>	Bagan Metode Penelitian.....	32
<b>Gambar 3. 3</b>	Dimensi <i>Trailer Car</i> Kereta LRT Palembang .....	35
<b>Gambar 3. 4</b>	Perbandingan Komponen .....	36
<b>Gambar 3. 5</b>	Penyederhanaan Model.....	37
<b>Gambar 3. 6</b>	<i>Flowchart</i> Penelitian dengan Metode Elemen Hingga .....	40
<b>Gambar 3. 7</b>	Model Setengah <i>Carbody</i> .....	41
<b>Gambar 3. 8</b>	Pemberian <i>Symmetry Region</i> .....	42
<b>Gambar 3. 9</b>	Perbandingan Hasil <i>Mesh</i> .....	42
<b>Gambar 3. 10</b>	Grafik jumlah <i>node / element mesh</i> terhadap nilai maks deformasi total.....	46
<b>Gambar 3. 11</b>	Grafik jumlah <i>node / element mesh</i> terhadap nilai maks <i>stress von-mises</i> .....	46
<b>Gambar 3. 12</b>	<i>Meshing Quality</i> .....	47

<b>Gambar 3. 13</b>	Grafik <i>Mesh Quality</i> .....	48
<b>Gambar 3. 14</b>	Hasil <i>Meshing</i> .....	48
<b>Gambar 3. 15</b>	Detail Hasil <i>Meshing</i> .....	50
<b>Gambar 3. 16</b>	Kondisi batas tumpuan <i>fixed</i> pada analisis Belete Jirru .....	51
<b>Gambar 3. 17</b>	Kondisi Batas, Pembebanan Utama, Pembebanan Komponen .....	52
<b>Gambar 3. 18</b>	Gambaran Umum Kereta LRT Palembang .....	55
<b>Gambar 3. 19</b>	<i>Free Body Diagram</i> .....	55
<b>Gambar 3. 20</b>	<i>Free Body Diagram Trailer Carbody</i> .....	56
<b>Gambar 3. 21</b>	<i>Free Body Diagram Motor Carbody</i> .....	57
<b>Gambar 3. 22</b>	<i>Free Body Diagram</i> Kondisi Percepatan .....	58
<b>Gambar 3. 23</b>	<i>Free Body Diagram</i> pada <i>Motor Carbody</i> 2 Kondisi Percepatan .....	58
<b>Gambar 3. 24</b>	<i>Free Body Diagram</i> pada <i>Trailer Carbody</i> Kondisi Percepatan .....	59
<b>Gambar 3. 25</b>	<i>Free Body Diagram</i> Kondisi Perlambatan .....	59
<b>Gambar 3. 26</b>	<i>Free Body Diagram</i> pada <i>Motor Carbody</i> 1 Kondisi Perlambatan .....	60
<b>Gambar 3. 27</b>	<i>Free Body Diagram</i> pada <i>Trailer Carbody</i> Kondisi Perlambatan .....	60
<b>Gambar 3. 28</b>	Pemberian kondisi batas dan pembebanan pada ANSYS Workbench 18.0 .....	62
<b>Gambar 3. 29</b>	<i>Boundary Condition</i> Kasus Pembebanan I .....	64
<b>Gambar 3. 30</b>	<i>Boundary Condition</i> Kasus Pembebanan II .....	64
<b>Gambar 3. 31</b>	<i>Boundary Condition</i> Kasus Pembebanan III ....	65
<b>Gambar 3. 32</b>	<i>Boundary Condition</i> Kasus Pembebanan IV ....	65
<b>Gambar 3. 33</b>	Grafik <i>Mesh Convergent Test</i> Model dengan <i>fillet</i> (Pembebanan Vertikal) .....	67
<b>Gambar 3. 34</b>	Grafik <i>Mesh Convergent Test</i> Model tanpa <i>fillet</i> (Pembebanan Vertikal) .....	68
<b>Gambar 3. 35</b>	Grafik <i>Mesh Convergent Test</i> Model dengan <i>fillet</i> (Pembebanan Kompresi) .....	69



<b>Gambar 3. 36</b>	Grafik <i>Mesh Convergent Test</i> Model tanpa <i>fillet</i> (Pembebanan Kompresi).....	70
<b>Gambar 3. 37</b>	Grafik jumlah <i>node / element mesh</i> terhadap nilai maks deformasi total .....	73
<b>Gambar 4. 1</b>	Hasil deformasi pada arah longitudinal pada komponen <i>Main Support Beam</i> .....	97
<b>Gambar 4. 2</b>	Hasil Presentase Tegangan Maksimum terhadap Tegangan <i>Yield Material</i> .....	100
<b>Gambar 4. 3</b>	Hasil Deformasi Total .....	105

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b>	Kapasitas Penumpang.....	10
<b>Tabel 2. 2</b>	Pembebanan Vertikal .....	16
<b>Tabel 2. 3</b>	Pembebanan Kompresi.....	16
<b>Tabel 2. 4</b>	Pembebanan Tarik.....	16
<b>Tabel 2. 5</b>	Perbandingan Material Properties .....	25
<b>Tabel 3. 1</b>	<i>Material Properties</i> Alumunium 6061-T6 .....	33
<b>Tabel 3. 2</b>	<i>Material Properties</i> Alumunium 6005A-T6 .....	34
<b>Tabel 3. 3</b>	<i>Material Properties</i> SPA-H (JIS G 3125).....	34
<b>Tabel 3. 4</b>	Data Hasil Simulasi <i>Mesh Convergent Test</i> .....	45
<b>Tabel 3. 5</b>	Pembebanan Komponen.....	54
<b>Tabel 3. 6</b>	Data Berat <i>MotorCar</i> dan <i>TrailerCar</i> pada Kereta LRT Palembang.....	55
<b>Tabel 3. 7</b>	Hasil Perhitungan Aktual Pembebanan Kompresi dan Pembebanan Tarik.....	61
<b>Tabel 3. 8</b>	Variasi kasus pembebanan statik.....	63
<b>Tabel 3. 9</b>	Hasil Tegangan <i>Von-Mises</i> dengan Beban Vertikal (Model dengan <i>fillet</i> ).....	67
<b>Tabel 3. 10</b>	Hasil Tegangan <i>Von-Mises</i> dengan Beban Vertikal (Model tanpa <i>fillet</i> ).....	68
<b>Tabel 3. 11</b>	Hasil Tegangan <i>Von-Mises</i> dengan Beban Kompresi (Model dengan <i>fillet</i> ).....	69
<b>Tabel 3. 12</b>	Hasil Tegangan <i>Von-Mises</i> dengan Beban Kompresi (Model tanpa <i>fillet</i> ).....	70
<b>Tabel 3. 13</b>	Data dimensi model <i>carbody</i> kereta (Belete Jirru)..	71
<b>Tabel 3. 14</b>	Data <i>Mesh Convergent Test</i> .....	72
<b>Tabel 4. 1</b>	Hasil Tegangan Maksimum Von Mises pada Material Al 6061-T6 .....	79

**Tabel 4. 2** Hasil Tegangan Maksimum Von Mises pada Material Al 6005A-T6..... 84

**Tabel 4. 3** Hasil Tegangan Maksimum Von Mises pada Material SPA-H..... 89

**Tabel 4. 4** Hasil Deformasi Total Maksimum pada Material Al 6061-T6..... 92

**Tabel 4. 5** Hasil Deformasi Total Maksimum pada Komponen *Roof*..... 92

**Tabel 4. 6** Hasil Deformasi Total Maksimum pada Material Al 6005A-T6..... 95

**Tabel 4. 7** Hasil Deformasi Total Maksimum pada Komponen *Roof*..... 95

**Tabel 4. 8** Hasil Deformasi Maksimum terhadap sumbu x pada Komponen *Main Support Beam*..... 96

**Tabel 4. 9** Hasil Analisis Tegangan Von Mises Maksimum.... 98

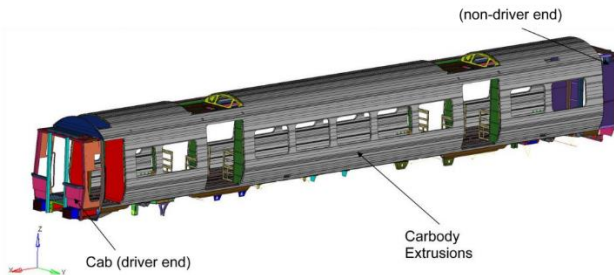
**Tabel 4. 10** Hasil Analisis Deformasi Total Maksimum ..... 104

# BAB I

## PENDAHULAN

### 1.1 Latar Belakang

Transportasi merupakan kegiatan memindahkan barang dan manusia dari tempat asal (*origin*) ke tempat tujuan (*destination*) yang memberi dampak pada perkembangan ekonomi di suatu daerah. Dikarenakan pergerakan manusia dalam menunjang perekonomian menjadi lebih efektif karena adanya sarana dan prasarana transportasi. Kota Palembang merupakan salah satu kota besar di Indonesia yang memiliki tingkat perekonomian yang semakin meningkat. Salah satu misi dari pemerintah kota Palembang adalah mengembangkan tingkat perekonomian dengan meningkatkan hubungan antar daerah melalui jejaring yang terkoneksi baik dari dalam maupun luar negeri. Jejaring tersebut tentunya harus didukung dengan meningkatnya sarana dan prasarana sistem transportasi yang modern dan memadai sehingga memberi citra positif terhadap kota.



**Gambar 1.1** Kontruksi *Carbody*  
(Randell, 2011)

LRT terdiri dari beberapa kontruksi utama, diantaranya *Carbody*, *Bogie*, *Mask of Car*, dan *Coupler*. *Carbody* merupakan bangun ruang yang berisi penumpang dan barang yang dibangun dengan kontruksi rangka seperti plat dan sebagai komponen

penting dalam sarana transportasi berbasis rel. *Carbody* terdiri dari beberapa komponen penting, diantaranya *Underframe*, *Side Wall*, *Roof*, *Main Support Beam* dan *End Center Sill*, dan *End Wall*. Komponen-komponen tersebut merupakan kontruksi dasar yang akan membentuk *Carbody* seperti pada gambar 1.1.

## 1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah, sebagai berikut:

- a. Bagaimana hasil tegangan *von mises* dari analisis struktur pada kontruksi *Carbody* kereta LRT Palembang dengan pemodelan elemen hingga?
- b. Bagaimana hasil deformasi total dari analisis struktur pada kontruksi *Carbody* kereta LRT Palembang dengan pemodelan elemen hingga?
- c. Berapa angka keamanan dari desain *Carbody* kereta LRT Palembang sesuai dengan standarisasi dengan menggunakan metode elemen hingga?
- d. Apakah Material Aluminium Ekstrusi 6005A-T6 dapat menggantikan fungsi Aluminium Ekstrusi 6061-T6 pada kontruksi *carbody* kereta LRT Palembang?
- e. Bagaimana efek dari pembebanan kompresi dan tarikan terhadap deformasi total pada kontruksi *carbody* kereta LRT Palembang?
- f. Bagaimana hasil deformasi total pada komponen *roof* akibat adanya pembebanan vertikal komponen *Air Conditioning*?

## 1.3 Ruang Lingkup

Ruang lingkup pada penelitian ini meliputi :

### 1.3.1 Variabel yang diteliti

- a. Analisis deformasi total pada kontruksi *Carbody* kereta LRT Palembang menggunakan metode elemen hingga (MEH).
- b. Analisis struktur pada kontruksi *Carbody* kereta LRT

Palembang dengan fokus meninjau aspek tegangan *von mises* menggunakan metode elemen hingga (MEH).

- c. *Element mesh* yang digunakan pada proses perhitungan metode elemen hingga menggunakan *Element Shell* (SHELL 281).

### 1.3.2 Variabel yang diabaikan

- a. Penelitian ini hanya meliputi analisis dengan menggunakan metode elemen hingga, dengan prosedur sesuai dengan standarisasi.
- b. Kondisi pembebanan adalah kondisi pembebanan statis, dimana gaya-gaya luar seperti gaya hambat udara yang mempengaruhi perubahan beban konstruksi *Carbody* diabaikan.
- c. Sambungan las dari setiap *joint* dianggap sempurna, sehingga keseluruhan bentuk rangka merupakan satu kesatuan.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah, sebagai berikut :

- a. Mengetahui nilai dan posisi tegangan *von mises* maksimum dari hasil analisis struktur pada konstruksi *Carbody* kereta LRT Palembang dengan pemodelan elemen hingga.
- b. Mengetahui nilai dan posisi deformasi total maksimum dari hasil analisis struktur pada konstruksi *Carbody* kereta LRT Palembang dengan pemodelan elemen hingga.
- c. Mengetahui angka keamanan dari desain *Carbody* kereta LRT Palembang sesuai dengan standarisasi dengan menggunakan metode elemen hingga.
- d. Memastikan Material Aluminium Ekstrusi 6005A-T6 dapat menggantikan fungsi Aluminium Ekstrusi 6061-T6 pada konstruksi *carbody* kereta LRT Palembang.
- e. Mengetahui efek dari pembebanan kompresi dan tarikan terhadap deformasi total pada konstruksi *carbody* kereta LRT Palembang.
- f. Mengetahui nilai deformasi total maksimum pada komponen *roof* akibat adanya pembebanan vertikal

komponen *Air Conditioning*.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penulisan penelitian ini adalah, sebagai berikut :

- a. Memberikan kontribusi dalam pengembangan *Carbody* kereta LRT yang bisa digunakan sebagai referensi acuan dalam melakukan analisa simulasi menggunakan perangkat lunak FEA.
- b. Memacu mahasiswa terutama Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember untuk mengembangkan penelitian yang berkelanjutan.
- c. Membantu mahasiswa untuk lebih memahami penggunaan metode elemen hingga.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

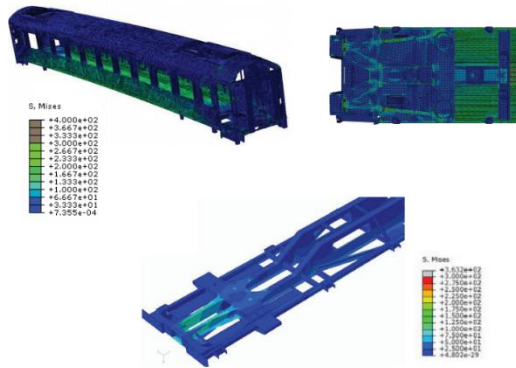
### 2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terkait dengan analisis tegangan statis pada *carbody* kereta dengan menggunakan metode elemen hingga pernah dilakukan oleh **Baykasoglu et al (2012)**. Dalam penelitiannya yang berjudul “*Numerical Static and Dynamic Stress Analysis on Railway Passenger and Freight Car Models*”, Baykasoglu melakukan penelitian analisis tegangan, getaran dan tabrakan pada struktur *carbody* dengan tipe kereta penumpang yang terbuat dari material *steel* dengan metode elemen hingga. Dalam penelitiannya **Bayaksoglu et al (2012)** melakukan analisis tegangan pada *carbody* kereta api penumpang yang digunakan oleh *Turkish State Railways*. *Carbody* yang dianalisa terbuat dari 5 bahan material *steel* yang berbeda (seperti *stainless steel*, St 12, Stw 24, St 37, dan St 52) yang diaplikasikan pada *side wall*, *underframe*, *roof*, dan *end wall*. Dan untuk *main support beam* terbuat dari material *steel* St 52. Bobot *carbody* sekitar 25 ton sudah termasuk berat total kedua *bogie* tersebut. (Baykasoglu, 2012)

Untuk mendapatkan akurasi dan efisiensi dalam simulasi dengan metode numerik, Baykasoglu melakukan uji konvergensi dengan menggunakan tingkat penyempitan *mesh* pada daerah kritis dihitung dan tingkat *mesh* yang dapat diterima dipertimbangkan. Jumlah elemen dan *node* pada model *carbody* bernilai 1656900 elemen dan 1682540 *node*. Model tersebut terdiri dari elemen *shell* segiempat orde pertama. Baykasoglu menggunakan standar UIC CODE OR 577 dan ERRI B12 / RP17 untuk mendapatkan karakteristik struktur statik dari *carbody* kereta api penumpang. (Baykasoglu, 2012)

**Bayaksoglu et al (2012)** memasang pada bagian bawah *main support beam* yang merupakan tumpuan *spring bogie*

sebagai tumpuan *fixed* ( $x=0$ ,  $y=0$ , dan  $z=0$ ). Pembebanan pada *carbody* yang dilakukan oleh Baykasoglu berupa gaya tekan simetris dan gaya tarik. Pada penelitian ini Baykasoglu memberikan pembebanan gaya tarik sebesar 100 ton untuk *carbody* dan total 200 ton kekuatan kompresi simetris untuk *carbody* kereta api penumpang dengan kondisi kereta api kosong.

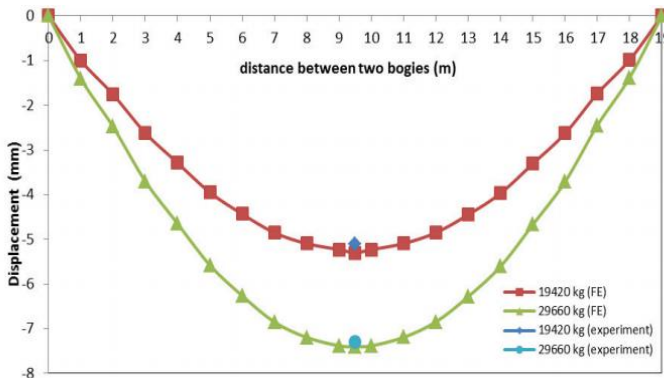


**Gambar 2.1** Hasil simulasi tegangan pada *carbody* (Baykasoglu, 2012)

Baykasoglu menggunakan dua variasi pembebanan vertikal, yaitu pembebanan saat kondisi tanpa penumpang dan pembebanan saat kondisi penuh dengan penumpang. Pada penelitian yang dilakukan oleh Baykasoglu didapatkan nilai deformasi total maksimum sebesar 5.1245 mm dan tegangan Von Mises maksimum sebesar  $1.7557 \times 10^8$  Pa pada saat kondisi pembebanan vertikal tanpa penumpang, dan didapatkan juga data deformasi total maksimum sebesar 7.683 mm dan  $2.374 \times 10^8$  Pa pada saat kondisi pembebanan vertikal penuh dengan penumpang. (Baykasoglu, 2012)

Pada penelitian ini, **Bayaksoglu et al (2012)** melakukan validasi dengan melakukan eksperimen langsung pada *Carbody* kereta api penumpang *Turkish State Railways*. Gambar 2.2 menunjukkan grafik perbandingan antara hasil dengan menggunakan metode elemen hingga dan hasil dengan

melakukan eksperimen. Dari grafik tersebut dapat terlihat bahwa hasil pemodelan elemen hingga yang dilakukan Baykasoglu valid, karena hasil *displacement* maksimumnya ditunjukkan pada angka yang relati sama baik dalam kasus *carbody* tanpa penumpang maupun *carbody* dengan penumpang. (Baykasoglu, 2012)

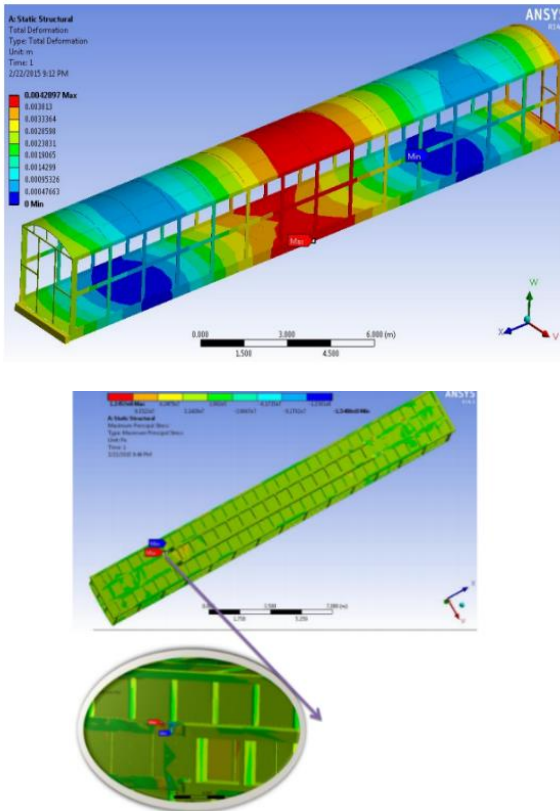


**Gambar 2.2** Grafik perbandingan hasil *Finite Element* dan hasil eksperimen  
(Baykasoglu, 2012)

Pada tahun 2015, **Belete Jirru (2015)** melakukan penelitian analisa struktur pada *carbody* dengan menggunakan metode elemen hingga. Pada penelitiannya menggunakan *carbody* dengan tipe kereta penumpang. *Carbody* dimodelkan menggunakan software CATIA V5-R20 yang kemudian di-import pada software ANSYS workbench untuk dilakukan analisa struktur statik dengan metode elemen hingga. *Carbody* yang dianalisis pada penelitian ini menggunakan material *Steel 36*. (Jirru, 2015)

Pada simulasi statik struktural yang dilakukan oleh Belete Jirru mengasumsikan kapasitas penumpang berjumlah 109 orang dengan masing masing penumpang memiliki berat 65 kg, sehingga didapatkan nilai dari beban vertikal. Tekanan dengan

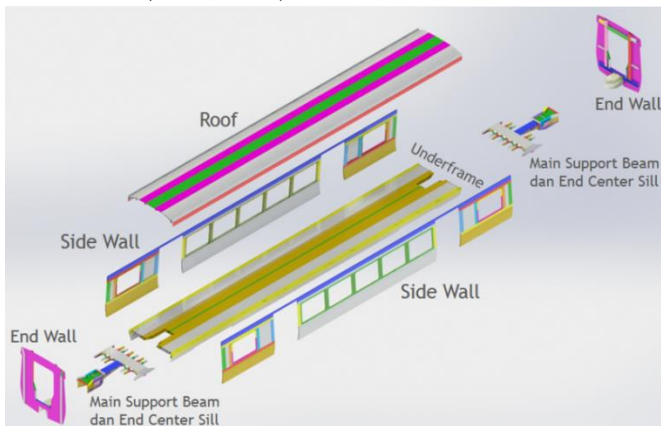
nilai 29820 Pa merupakan beban vertikal dan beban tekan gabungan pada rangka bawah yang diaplikasikan pada simulasi statik struktural yang dilakukan Belete Jirru. Analisa yang dilakukan oleh Belete Jirru berupa analisa total deformasi yang terjadi dan analisa tegangan *principal* maksimal yang terjadi. Pada penelitian yang dilakukan oleh Belete Jirru didapatkan nilai deformasi total maksimum sebesar 0.0042897 m dan tegangan *principal* maksimum sebesar  $1.2457 \times 10^8$  Pa. (Jirru, 2015)



**Gambar 2.3** Hasil analisa (a) Deformasi total.  
(b) Tegangan *principal* maksimal.  
(Jirru, 2015)

## 2.2 *Carbody*

Semua rincian desain struktur *carbody* harus disetujui oleh *engineer*. Desain *carbody* harus memiliki tampilan aerodinamis yang modern, yang memerlukan perawatan minimal, dan memiliki tingkat ketahanan terhadap kecelakaan yang tinggi sehingga secara desain struktur dapat menahan kerusakan yang terjadi, lebih mudah dalam proses perbaikan struktur, dan meminimalkan cedera pada penumpang. Semua sambungan yang dihubungkan secara mekanis dirancang dengan menggunakan faktor keamanan 2.0 berdasarkan beban pada sambungan. Begitu juga gaya gesekan harus diabaikan pada sambungan yang dihubungkan secara mekanis. (Jirru, 2015)



**Gambar 2.1** Bagian-bagian utama pada *Carbody*

*Carbody* yang dirancang dengan struktur ringan bertujuan untuk mengurangi massa dengan demikian kebutuhan energi operasional yang terpakai seminimal mungkin. Persyaratan desain struktur *carbody* harus memenuhi beban statis. Beban statis merupakan beban yang didistribusikan pada objek ketika objek dalam keadaan statis atau diam. Selain harus memenuhi beban statis utama, *carbody* dirancang untuk memberi kenyamanan bagi penumpang. (Spiryagin, 2014)

*Carbody* pada kereta *Light Railway Transit* ini dibagi menjadi beberapa bagian utama, yaitu *Underframe*, *Side wall*, *End wall*, *Roof* dan *Main Support Beam* dan *End Center Sill*.

### 2.3 Spesifikasi Teknis Kereta LRT Palembang

Kereta LRT Palembang dirancang dengan Standar Internasional (SI) untuk satuan berat dan dimensi. Bahan, komponen standar atau rancangan standar secara umum mengacu pada Standar Industri Perkeretaapian yang berlaku seperti :

- a) JIS : *Japanese Industrial Standard*
- b) UIC : *Union Internationale des Chemis de Fer*
- c) AAR : *Association of American Railroads*
- d) Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM. 175 Tahun 2015 tentang Standar Spesifikasi Teknis Kereta Kecepatan Normal.
- e) EN 12663-1 *Railway Application-Structural Requirement of Railway Vehicle Bodies*
- f) ISO 2631 *Mechanical Vibration and Shock Evaluation of Human Exposure to Whole*

**Tabel 2.1** Kapasitas Penumpang

Uraian		MC <sub>1</sub>	T	MC <sub>2</sub>
Desain 4 Orang/m <sup>2</sup>	Kursi	40	48	40
	Berdiri	81	89	81
	Total	121	137	121
Total Penumpang				<b>379</b>
Desain 8 Orang/m <sup>2</sup>	Kursi	40	48	40
	Berdiri	162	177	162
	Total	202	225	202
Total Penumpang				<b>629</b>

Satu set LRT terdiri dari tiga kereta, dengan dua kereta penggerak berkabin dan satu kereta pengikut tanpa kabin, atau susunan rangkaian dapat disesuaikan dengan kebutuhan operasional atau desain pabrikan dan dapat disusun *Multiple Unit*.

Kecepatan operasional maksimum 85 km/jam (kecepatan desain 100 km/jam). (Ardhian, 2016)

Susunan rangkaian satu set LRT terdiri dari :  $MC_1 - T - MC_2$

MC : *Motor Car with Driver's Cabin*, kereta dengan roda penggerak dan mempunyai kabin Masinis

T : *Trailer Car*, kereta pengikut

## **2.4 Metode Elemen Hingga**

### **2.4.1 Konsep Dasar Metode Elemen Hingga**

Metode elemen hingga adalah prosedur numerik untuk memecahkan masalah mekanika kontinum dengan ketelitian yang dapat diterima oleh rekayasawan. Metode elemen hingga ini dapat dipakai untuk memecahkan berbagai masalah. Daerah yang dianalisis dapat mempunyai bentuk, beban, dan kondisi batas yang sembarang. Jaring-jaringnya dapat terdiri atas elemen yang berbeda jenis, bentuk dan besaran fisiknya. Kemudahan penggunaan berbagai hal tersebut bisa saja tergabung pada satu program komputer, yaitu dengan menyiapkan data pemilihan jenis, geometri, kondisi batas, elemen, dan sebagainya. Keunggulan dari metode elemen hingga adalah adanya arti fisik yang cukup dekat antara jaring elemen dengan struktur aktualnya. Jaring yang dimaksud bukan merupakan abstrak matematis yang sulit untuk divisualisasikan. Namun hasil yang diperoleh dengan metode ini untuk masalah tertentu adalah berupa hasil numerik, tidak ada persamaan bentuk tertutup yang dapat dipakai untuk kasus serupa yang hanya berbeda parameternya. (Cook, 1990)

### **2.4.2 Prosedur Metode Elemen Hingga dengan Menggunakan Software**

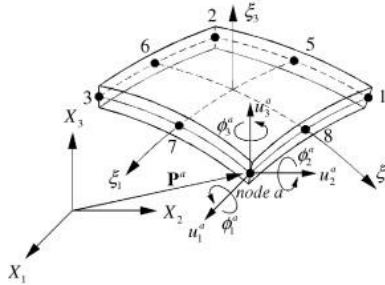
Tahapan langkah-langkah dalam menyelesaikan analisis struktur menggunakan *software* elemen hingga secara garis besar menjadi sebagai berikut :

1. Pembuatan geometri awal struktur yang akan dianalisis
2. Penentuan jenis material dan properti dari material yang digunakan  
Hal ini berkenaan dengan massa jenis dari material tersebut, seperti modulus elastis (*modullus young*), *poisson ratio*, *tensile yield strength*, *tensile ultimate strength*.
3. Penentuan jumlah elemen yang akan diberikan pada model geometri tersebut.
4. Pembuatan elemen dari hasil pemodelan geometri struktur yang akan dianalisa (*mesh generation*)
5. Pemberian kondisi batas (*Boundary Condition*)  
Kondisi batas diperlukan untuk menentukan bagaimana model tertumpu pada dudukannya dalam kondisi nyata. Hal ini sangat menentukan bagaimana hasil dari analisa model geometri tersebut. Berbagai macam kondisi batas yang biasa digunakan antara lain *fixed-fixed*, *fixed-free*, *free* dsb.
6. Pemberian kondisi pembebanan (*loading condition*)  
Kondisi pembebanan yang diberikan pada model struktur bergantung dengan kondisi nyatanya. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan hasil yang sedekat mungkin dengan kondisi kenyataannya. Beban yang biasa digunakan antara lain baban gaya, tekanan, momen baik statik maupaun dinamis.
7. Analisa  
Langkah ini merupakan langkah terakhir dalam tahapan analisa metode elemen hingga. Analisa dilakukan dengan bantuan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga. Jenis analisa yang dapat dilakukan juga bervariasi dari jenis statis, dinamis, *buckling* maupun analisa perpindahan panas. (Syah, 2017)



### 2.4.3 Elemen *Shell*

Elemen *shell* merupakan elemen khusus yang digunakan pada desain model struktur yang relatif tipis. Elemen *shell 8 node* terdiri atas delapan *node* pada ujung-ujungnya, seperti yang terlihat pada gambar 2.5 dan setiap *node* memiliki lima derajat kebebasan *unconstrained* sehingga setiap elemen memiliki 40 derajat kebebasan *unconstrained*. (Bhatti, 2005)



**Gambar 2.5** Elemen *Shell*

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836813004526>)

Koordinat global setiap titik pada elemen dapat dinyatakan sebagai :

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^8 N_i \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{Bmatrix} + \sum_{i=1}^8 N_i \zeta \frac{t_i}{2} \begin{Bmatrix} l_{3i} \\ m_{3i} \\ n_{3i} \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

Dimana  $l_{3i}$ ,  $m_{3i}$ ,  $n_{3i}$  merupakan cosinus arah vektor  $v_{3i}$  terhadap arah normal bidang tengah yang merentang pada ketebalan  $t_i$  di *node* -i. (ANSYS, 2009)

$$v_{3i} = \begin{Bmatrix} x_j - x_k \\ y_j - y_k \\ z_j - z_k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} l_{3i} \\ m_{3i} \\ n_{3i} \end{Bmatrix} t_i \quad (2.2)$$

Titik  $j$  dan  $k$  pada persamaan diatas terletak pada permukaan *shell*.

*Displacement* global sebarang titik pada elemen *shell* dalam arah sumbu koordinat global dinyatakan sebagai :

$$U = \{u, v, w\}$$

*Displacement node*  $i$  terdiri dari translasi (yang sama dengan arah global) ditambah dengan dua rotasi kecil  $\alpha_i$  dan  $\beta_i$  terhadap sumbu koordinat lokal  $x'$  dan  $y'$ , sehingga :

$$q_i = \{u_i, v_i, w_i, \alpha_i, \beta_i\} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 8)$$

*Displacement global* dapat dinyatakan dalam *displacement node*  $i$  sebagai berikut :

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^8 N_i \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix} + \sum_{i=1}^8 N_i \zeta \frac{t_i}{2} [\mu_i] \begin{Bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

Dimana :

$N_i$  = fungsi bentuk

$t_i$  = ketebalan *shell* pada *node* -i

$$\mu_i = \text{cosinus arah vektor } v_{2i} \text{ dan } v_{1i} = \begin{bmatrix} -l_{2i} & l_{1i} \\ -m_{2i} & m_{1i} \\ -n_{2i} & n_{1i} \end{bmatrix}$$

$\zeta$  = sumbu koordinat natural

$\alpha_i$  = rotasi terhadap sumbu koordinat lokal  $x'$

$\beta_i$  = rotasi terhadap sumbu koordinat lokal  $y'$

(ANSYS, 2009)

## 2.5 Standarisasi

### 2.5.1 Standarisasi EN-12663-1:2010 (*British Standards*)

Tujuan Standar EN 12663 ini adalah untuk memberikan kemudahan dalam mengoptimalkan rancangan desain *Carbody* dengan mempertahankan tingkat keamanan yang telah memenuhi syarat. *Carbody* harus mampu menahan beban maksimum sesuai dengan persyaratan operasional. Semua parameter formal pada standarisasi ini dinyatakan sebagai unit dasar SI, untuk

percepatan gravitasi yang digunakan bernilai  $-9,81 \text{ m/s}^2$ . (*British Standard*, 2010)

Untuk penerapan Standar EN 12663 ini, semua kereta diklasifikasikan dalam beberapa kategori. Klasifikasi dari berbagai kategori kereta didasarkan hanya pada persyaratan struktural desain *carbody*. Kereta penumpang dibagi menjadi lima kategori desain struktural, diantaranya :

- Kategori P-I misalnya kereta pada umumnya.
- Kategori P-II misalnya kereta dengan unit tetap.
- Kategori P-III misalnya kereta bawah tanah, kereta ringan, dan kereta angkutan cepat.
- Kategori P-IV misalnya kereta metro ringan, kereta listrik ringan.
- Kategori P-V misalnya kereta dengan satu set rel yang membentuk rute trem.

Kereta LRT Palembang termasuk dalam kategori P-IV yaitu kereta listrik ringan. Sehingga pada standarisasi ini pembebanan dan batasan yang digunakan mengacu pada kategori P-IV.

Persyaratan kekuatan statis dan stabilitas struktural pada *carbody* harus ditunjukkan dengan perhitungan dan pengujian, bahwa tidak ada deformasi permanen secara keseluruhan. Persyaratan ini ditunjukkan dengan membandingkan tegangan yang dihitung dengan tegangan yang diizinkan harus menghasilkan nilai kurang dari atau sama dengan 1 sesuai dengan persamaan 2.4. (*British Standard*, 2010)

$$U = \frac{\sigma_c S}{R_m} \leq 1 \quad (2.4)$$

Dimana :

- U sebagai utilisasi
- S sebagai faktor keamanan
- $R_m$  sebagai nilai dari *ultimate stress* material
- $\sigma_c$  sebagai hasil tegangan dari perhitungan

Locomotives	Passenger rolling stock					Freight wagons	
Category L	Category P-I	Category P-II	Category P-III	Category P-IV	Category P-V	Category F-I	Category F-II
$1,3 \times g \times m_1$	$1,3 \times g \times (m_1 + m_4)$					$1,3 \times g \times (m_1 + m_3)^a$	

<sup>a</sup> If the application produces a higher proof load (e.g. due to dynamic effects or loading conditions) then a higher value shall be applied and defined in the specification.

### Tabel 2.3 Pembebanan Kompresi

Locomotives	Passenger rolling stock					Freight wagons	
Category L	Category P-I	Category P-II	Category P-III	Category P-IV	Category P-V	Category F-I	Category F-II
2 000	2 000	1 500	800	400	200	2 000 *	1 200 *

\* Compressive force applied to the draw gear stops "c", if this draw gear stop is used (see EN 12663-2).  
When the compressive force is applied on side buffers, then half of the value shall be used for each buffer axis.

**Tabel 2.4** Pembebanan Tarik

Locomotives	Passenger rolling stock					Freight wagons	
Category L	Category P-I	Category P-II	Category P-III	Category P-IV	Category P-V	Category F-I	Category F-II
1 000 <sup>a</sup>	1 000 <sup>a</sup>	1 000	600 <sup>b</sup>	300 <sup>b</sup>	150 <sup>b</sup>	1 500 <sup>c</sup> 1 000 <sup>d</sup>	1 500 <sup>c</sup> 1 000 <sup>d</sup>

<sup>a</sup> A higher force (e.g. 1 500 kN) may be necessary for certain types of coupling.

<sup>b</sup> These values can be adjusted but shall cover the maximum force which can be developed in normal operation or emergency recovery.

<sup>c</sup> Tensile force of 1 500 kN applied to the draw gear stops "a", if this draw gear stop is used (see EN 12663-2).

<sup>d</sup> Tensile force of 1 000 kN applied to the draw gear stops "b", if this draw gear stop is used and for other types for coupling attachment (see EN 12663-2).

Pembebanan tarik yang digunakan dalam perancangan *car body* dijelaskan pada tabel 2.4 sesuai dengan kategorinya.

### 2.5.2 Standarisasi PM 175 Tahun 2015 (Nasional)

Rangka dasar harus memenuhi persyaratan dapat menahan beban, getaran, dan guncangan sebesar berat kereta, tahan terhadap korosi, dan kontruksi menyatu atau tidak menyatu dengan badan kereta. Badan kereta terdiri dari ruang penumpang, dan ruang masinis. Badan kereta harus mempunyai kekuatan serta kekakuan tinggi terhadap pembebanan tanpa terjadi perubahan bentuk (deformasi) tetap. Dalam hal pembebanan terhadap badan kereta, harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- a. Beban kompresi longitudinal yang merupakan beban statis yang dikenakan pada rangka dasar atau badan kereta, diperhitungkan bersama beban vertikal dan tanpa beban vertikal,
- b. Beban kompresi longitudinal dipersyaratkan sebagai berikut :
  1. Minimal 500kN untuk kereta kecepatan normal dengan penggerak sendiri dengan beban gandar besar (*Heavy Rail Transport*)
  2. Minimal 400kN untuk kereta api kecepatan normal dengan penggerak sendiri dengan beban gandar ringan (*Light Rail Transit*) yang berupa rangkaian dengan sejumlah kereta.
  3. Minimal 200 kN untuk kereta api kecepatan normal dengan penggerak sendiri dengan beban gandar ringan (*Light Rail Transit*) yang berupa kereta api dengan maksimal dua unit kereta.
- c. Beban vertikal badan kereta diperhitungkan berdasarkan formula sebagai berikut :
 
$$P_v = k (P_1 + P_2)$$

$P_v$  = beban vertikal  
 $K$  = 1,3 (koefisien dinamis)  
 $P_1$  = berat badan kereta siap operasi

P2 = jumlah penumpang x 57,7 kg  
 (Data berat orang Asia sesuai dengan artikel  
 “*The weight of nations: an  
 estimation of adult human biomass*”)

P2 memperhitungkan jumlah penumpang duduk dan  
 jumlah berdiri maksimum 8 orang/m<sup>2</sup>

Perancangan kontruksi *carbody* dapat diterima ketika tegangan yang terjadi pada beban maksimum pada titik kritis kontruksi badan kereta, untuk tegangan tarik maupun tegangan geser maksimum 75% tegangan mulur bahan. (Menteri Perhubungan Republik Indonesia, 2015)

### 2.5.3 Standarisasi Defleksi

Standarisasi defleksi yang dijadikan acuan pada penelitian ini mengacu pada laporan yang dibuat oleh *Central Corridor Light Rail Transit* pada bulan Juli tahun 2008. Dalam laporan ini dijelaskan bahwa defleksi terhadap arah vertikal yang terjadi pada *underframe* tidak melebihi 0.375 in atau 9.525 mm dengan pembebanan maksimum (pembebanan dengan penumpang penuh). (Harris, 2008)

## 2.6 Konsep Tegangan dan Regangan

### 2.6.1 Konsep Tegangan

Secara sederhana tegangan dapat didefinisikan sebagai besaran gaya yang bekerja pada satu satuan luas permukaan benda yang dikenakan oleh gaya. Tegangan dibagi menjadi dua macam, yaitu tegangan normal dan tegangan geser. (Hibbeler, 2008)

Tegangan normal adalah tegangan yang bekerja secara tegak lurus pada permukaan benda ( $\sigma$ ).

$$\sigma_z = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \quad (2.5)$$

Tegangan geser adalah tegangan yang bekerja sejajar dengan permukaan benda ( $\tau$ ).

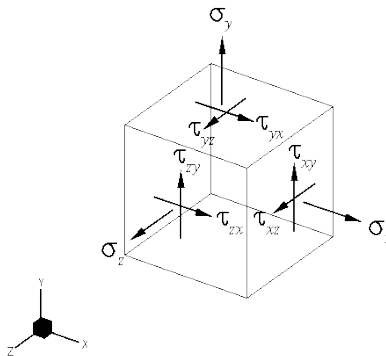
$$\tau_{zx} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta A} \quad \tau_{zy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta A} \quad (2.6)$$

Secara matematis definisi tegangan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{P}{A} [\text{N/mm}^2] \quad (2.7)$$

keterangan :  $P$  = gaya [N];

$A$  = luas permukaan yang dikenakan gaya [ $\text{mm}^2$ ]

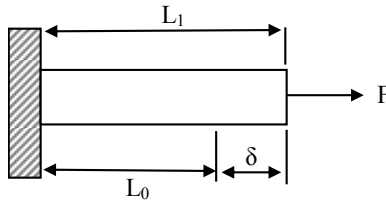


**Gambar 2.6** Komponen tegangan

([www.engapplets.vt.edu/Mohr/MohrCircles2-3D/Theory](http://www.engapplets.vt.edu/Mohr/MohrCircles2-3D/Theory))

Dalam kasus tegangan tiga dimensi, sebuah elemen tegangan akan menderita tegangan-tegangan normal pada semua permukaannya. Tegangan-tegangan geser memiliki dua buah indeks bawah, dimana yang pertama menunjukkan bidang tegangan kerja dan yang kedua mengidentifikasi arahnya dalam bidang tersebut. (Hibbeler, 2008)

### 2.6.2 Konsep Regangan



**Gambar 2.7** Perubahan Bentuk karena Beban Tarik

Untuk memperoleh satuan deformasi atau regangan ( $\varepsilon$ ) adalah dengan membagi perpanjangan ( $\delta$ ) dengan Panjang mula-mula ( $L_0$ ) dari suatu spesimen. Regangan dapat dirumuskan : (Hibbeler, 2008)

$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{\delta}{L_0} \quad (2.8)$$

Keterangan :

$\varepsilon$  = regangan

$L_0$  = panjang awal [mm]

$L_1$  = Panjang akhir [mm]

$\delta$  = perubahan panjang [mm]

### 2.6.3 Hubungan Tegangan dan Regangan

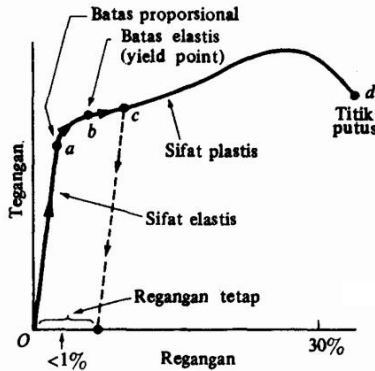
Hubungan tegangan dan regangan dapat ditunjukkan dalam gambar 2.8. Rasio antara tegangan dan regangan normal dapat disebut Modulus Young atau Modulus Elastisitas, merupakan *tangen* dari sudut yang terbentuk antara garis hubungan tegangan dan regangan dengan garis sumbu regangan dan dinotasikan : (Hibbeler, 2008)

$$E = \tan \theta = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.9)$$

Keterangan :  $E$  = modulus elastisitas [ $\text{kg} \cdot \text{mm/s}^2$ ]

$\theta$  = sudut antara garis hubungan regangan dengan garis sumbu regangan [ $^\circ$ ]





**Gambar 2.8** Kurva Tegangan dan Regangan  
(<http://fisikazone.com>)

## 2.7 Analisis yang Digunakan

### 2.7.1 Analisis Deformasi Total

Deformasi adalah perubahan bentuk, posisi, dan dimensi dari suatu benda. Berdasarkan definisi tersebut deformasi dapat diartikan sebagai perubahan kedudukan atau pergerakan suatu titik pada suatu benda secara absolut maupun relatif. Bila suatu batang lurus diberikan beban tarik, maka batang akan bertambah panjang. Regangan didefinisikan sebagai pertambahan panjang atau pemuaian. Pertambahan panjang persatuan panjang disebut satuan regangan. Secara matematis dapat dituliskan sebagai :

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l} \quad (2.10)$$

Dimana :

$\varepsilon$  = Regangan

$\delta$  = Pertambahan panjang ( $m$ )

$l$  = Panjang mula-mula ( $m$ )

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2.11)$$

Dimana :

$\sigma$  = Tegangan

E = Elastisitas

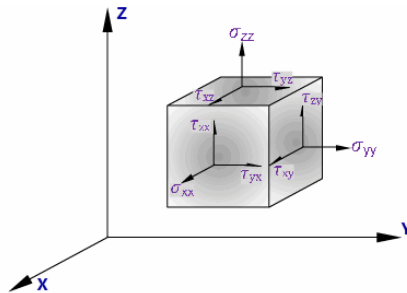
dimana  $\sigma = \frac{P}{A}$  maka didapatkan persamaan deformasi

$$\delta = \frac{P l}{E A} \quad (2.12)$$

Deformasi pada suatu benda 3 dimensi dengan koordinat kartesian dapat terbagi menjadi 3 deformasi, yaitu deformasi arah sumbu x, deformasi arah sumbu y, dan deformasi arah sumbu z. Deformasi total merupakan deformasi ekuivalen dari deformasi arah sumbu x, y, dan z yang terjadi pada objek penelitian. Analisis deformasi total digunakan karena geometri objek penelitian yang kompleks dan pembebanan yang tidak merata baik pada satu titik maupun pada satu luasan. (Hibbeler, 2008)

### 2.7.2 Analisis Kegagalan Teori Tegangan Von-Mises

Teori kegagalan ini menyatakan bahwa kegagalan terjadi apabila tegangan ekuivalen yang terjadi melewati harga tegangan *yield* material, serta faktor keamanan yang diambil adalah N, sehingga supaya tidak terjadi kegagalan: (Bower, 2008)



**Gambar 2.9** Arah tegangan pada kubus  
(<http://www.rockmechs.com>)

$$\sigma_v = \frac{\sigma_{ys}}{N} \quad (2.13)$$

Dimana :

$$\begin{aligned}\sigma_{von-mises} &= \text{tegangan von mises [N/m}^2\text{]} \\ \sigma_{ys} &= \text{tegangan yield material [N/m}^2\text{]}\end{aligned}$$

Berdasarkan gambar 2.9 maka  $\sigma_v$  dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\sigma_{von-mises} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]} \quad (2.14)$$

$$\sigma_{von-mises} = \sqrt{\frac{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]}{2}} \quad (2.15)$$

Dimana :

$$\begin{aligned}\sigma_{eq} &= \text{tegangan ekuivalen} & (\text{N/m}^2) \\ \sigma_{ys} &= \text{tegangan yield material} & (\text{N/m}^2) \\ \sigma_x &= \text{tegangan pada sumbu x} & (\text{N/m}^2) \\ \sigma_y &= \text{tegangan pada sumbu y} & (\text{N/m}^2) \\ \sigma_z &= \text{tegangan pada sumbu z} & (\text{N/m}^2) \\ \tau_{xy} &= \text{tegangan pada bidang x arah sumbu y} & (\text{N/m}^2) \\ \tau_{yz} &= \text{tegangan pada bidang y arah sumbu z} & (\text{N/m}^2) \\ \tau_{zx} &= \text{tegangan pada bidang z arah sumbu x} & (\text{N/m}^2) \\ \sigma_1 &= \text{tegangan prinsipal 1} & (\text{N/m}^2) \\ \sigma_2 &= \text{tegangan prinsipal 2} & (\text{N/m}^2) \\ \sigma_3 &= \text{tegangan prinsipal 3} & (\text{N/m}^2)\end{aligned}$$

Analisis tegangan *Von-Mises* ini digunakan karena objek penelitian memiliki geometri yang kompleks sehingga akan sulit untuk dianalisa dengan analisis tegangan yang lain. Tegangan *Von-Mises* merupakan suatu tegangan ekuivalen yang dapat dijadikan sebagai hasil perhitungan yang akan dibandingkan dengan batas tegangan *yield* material untuk mengetahui angka faktor keamanan dari desain objek penelitian. (Bower, 2008)

### 2.7.3 Konsentrasi Tegangan

Geometri benda sangat berpengaruh pada distribusi tegangan. Tegangan akan terkonsentrasi pada daerah – daerah dimana terjadi perubahan bentuk yang tiba - tiba seperti lubang dan takikan. Suatu diskontinuitas dalam benda misalnya lubang atau takik, akan mengakibatkan distribusi tegangan tidak merata disekitar diskontinuitas tersebut. Pada beberapa daerah didekat diskontinuitas, tegangan akan lebih tinggi daripada tegangan rata-rata yang jauh letaknya dari diskontinuitas. Jadi telah terjadi konsentrasi tegangan pada diskontinuitas. (Nusyirwan, 2010)

Konsentrasi tegangan dinyatakan dengan faktor tegangan  $K_t$ . Pada umumnya  $K_t$  adalah sebagai perbandingan antara tegangan maksimum dengan tegangan nominal terhadap dasar penampang sesungguhnya. (Deutchman, 1975)

$$K_t = \frac{\sigma_{maz}}{\sigma_{nominal}} \quad (2.16)$$

### 2.6 Perbandingan Al 6061-T6 dengan Al 6005A-T6

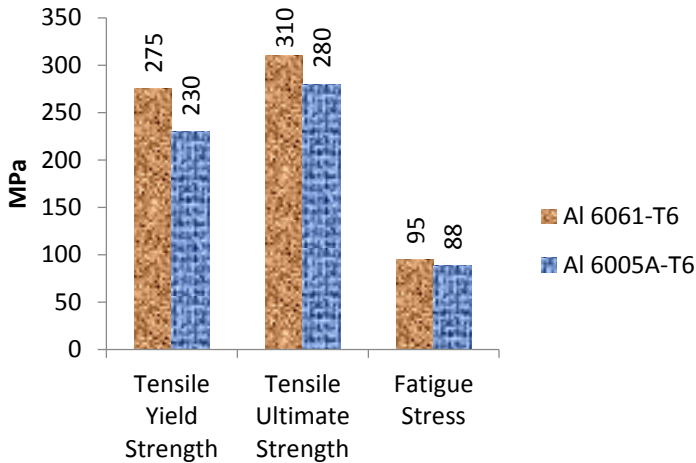
Material aluminium ekstrusi 6061-T6 pada umumnya merupakan material aluminium untuk kontruksi pesawat terbang. Aluminium 6061-T6 mempunyai keunggulan seperti kekuatan tarik yang relative tinggi, sifat mampu bentuk (*formability*) baik, tahan korosi dan merupakan logam ringan. Kelemahan Al 6061-T6 adalah sifat mampu las (*weldability*) relatif rendah dan sambungan las rentan terhadap kegagalan (*failure*). (Aalco Metals Ltd, 2016)

Material aluminium ekstrusi 6005A-T6 merupakan aluminium yang mudah dibentuk, sehingga mudah untuk membentuk profil kontruksi *carbody* kereta. Aluminium tipe ini memiliki keunggulan seperti tahan korosi, logam ringan dan memiliki sifat mampu las (*weldability*) yang baik. Namun memiliki nilai kekuatan tarik yang lebih rendah jika dibandingkan dengan aluminium ekstrusi 6061-T6. (Aalco Metals Ltd, 2016)

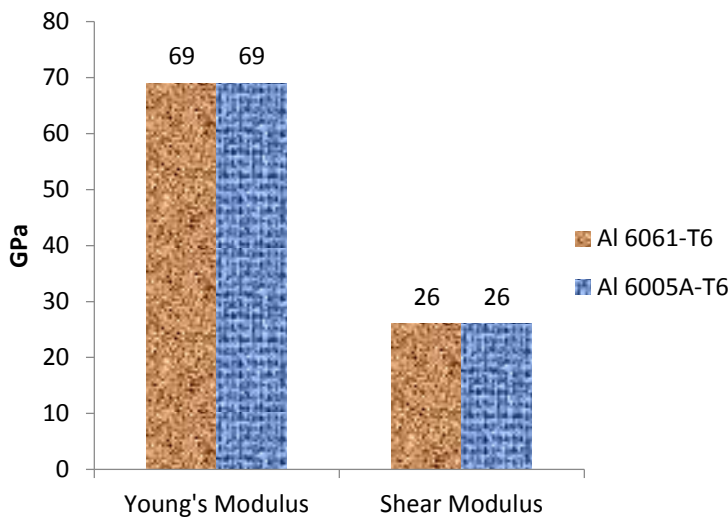
**Tabel 2.5** Perbandingan Material Properties

Properties	Material		Dimension
	Al 6061-T6	Al 6005A-T6	
Density	2700	2700	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Yield Strength	275	230	MPa
Tensile Ultimate Strength	310	280	MPa
Young's Modulus	69	69	GPa
Poisson's Ratio	0,33	0,33	
Fatigue Stress	95	88	MPa
Shear Modulus	26	26	GPa
Modulus of Resilience	520	370	kJ/m <sup>3</sup>

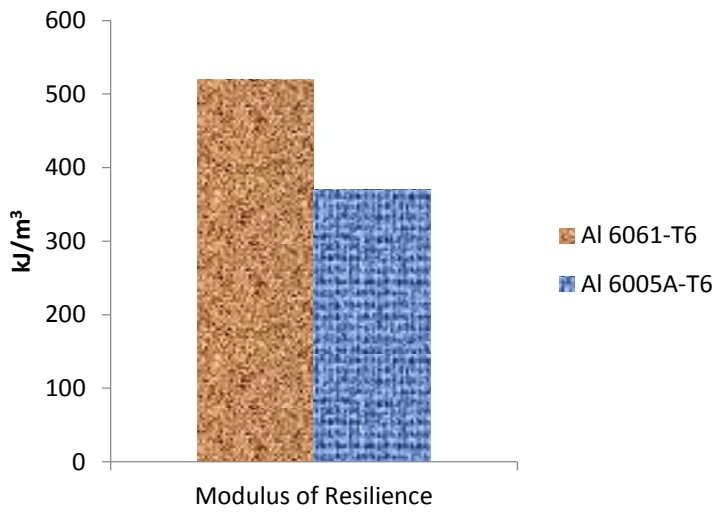
Pada Tabel 2.5 dapat dilihat perbandingan nilai properties antara material aluminium ekstrusi 6061-T6 dengan aluminium ekstrusi 6005A-T6 terlihat pada nilai *tensile yield strength*, *tensile ultimate strength*, *fatigue stress* dan *modulus of resilience*.



(a)



(b)



(c)

**Gambar 2.10** Perbandingan Nilai Properties Material Al 6061-T6 dengan Al 6005A-T6

Dari data tersebut dapat diketahui bahwa material Al 6061-T6 dan Al 6005A-T6 memiliki nilai *Modulus Elastisitas* yang sama yaitu 69 GPa, namun dari nilai tersebut tidak dapat diasumsikan bahwa nilai kekakuan Al 6061-T6 sama dengan nilai kekakuan Al 6005A-T6. Karena parameter kekakuan material tidak dilihat pada property *modulus elastisitas* saja. *Modulus of Resilience* yang merupakan kemampuan material dalam menyerap energi akibat adanya gaya dari luar tanpa terjadi deformasi plastis, menjadi parameter dalam menentukan kekakuan material. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa nilai *modulus of resilience* Al 6005A-T6 lebih rendah dibandingkan Al 6061-T6 sehingga dapat diasumsikan bahwa material Al 6061-T6 lebih kaku dibandingkan material Al 6005A-T6. (Aalco Metals Ltd, 2016)



**Gambar 2.11** Aluminium Ekstrusi untuk Kontruksi *Carbody*

Dari segi manufaktur pengelasan, aluminium ekstrusi 6005A-T6 lebih mudah dibandingkan aluminium ekstrusi 6061-T6. Kelebihan dari aluminium 6005A-T6 ini menjadi keunggulan tersendiri dalam proses manufaktur. Begitu juga dari segi harga, aluminium ekstrusi 6005A-T6 lebih murah dibandingkan aluminium ekstrusi 6061-T6. (Aalco Metals Ltd, 2016)

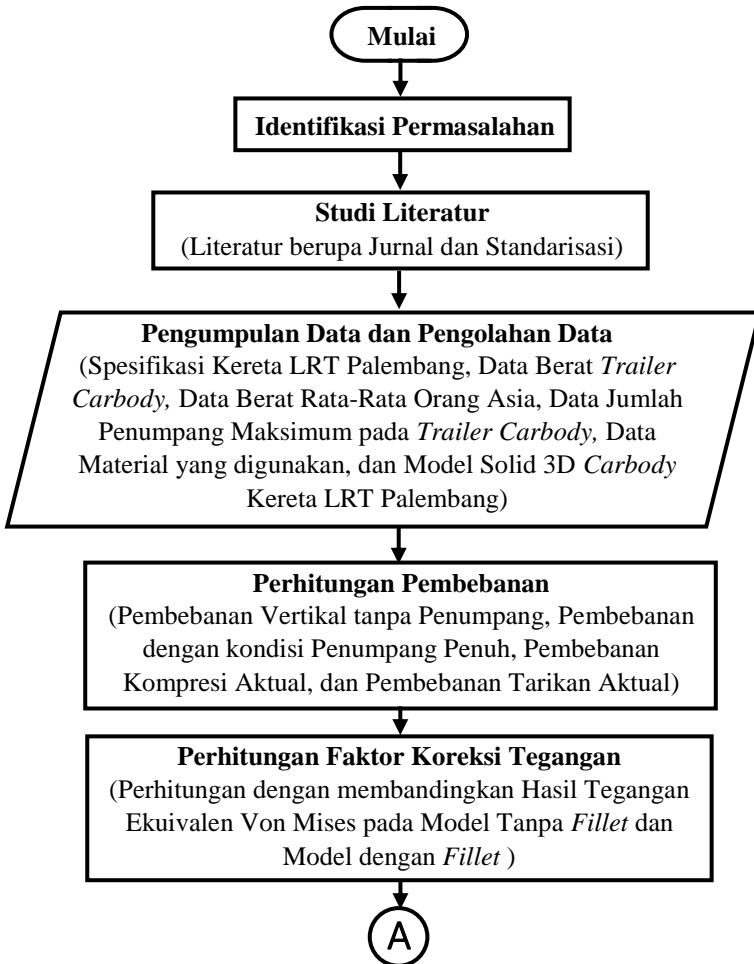
*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*



### BAB III

## METODE PENELITIAN

Metodologi Penelitian adalah sebuah upaya sistematis dalam rangka pemecahan masalah yang dilakukan, agar dapat menjawab permasalahan-permasalahan atau fenomena yang terjadi. *Flowchart* penelitian ditunjukkan pada gambar 3.1.



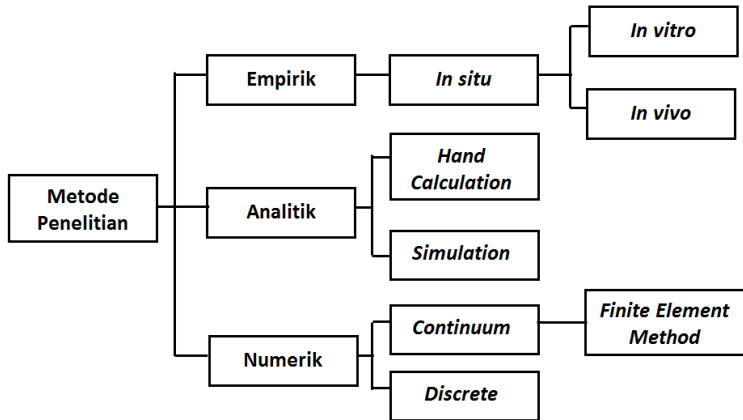




**Gambar 3.1** Flowchart Penelitian

Dalam bidang keteknikan, ada tiga metode yang dapat digunakan dalam proses penelitian, seperti tampak pada gambar 3.2. Setelah mengetahui macam macam metode penelitian, penulis memutuskan menggunakan Penelitian Numerik berupa *Finite Element Method* (FEM) atau Metode Elemen Hingga (MEH). Dikarenakan objek penelitian dapat dikatakan kompleks sehingga untuk melakukan analisis struktur statis tidak dapat dilakukan dengan analisa perhitungan manual, sehingga pada

penelitian ini menggunakan perhitungan metode elemen hingga dengan menggunakan software Ansys Workbench 18.0.



**Gambar 3.2** Bagan Metodologi Penelitian  
(Syah, 2017)

### 3.1 Model Material

Dalam proses perhitungan dengan metode elemen hingga tahap pertama adalah mengaplikasikan material. Data referensi material yang digunakan pada penelitian ini merujuk pada data yang digunakan oleh PT. INKA. Material yang digunakan untuk komponen *underframe*, *roof*, *side wall*, dan *end wall* adalah *Aluminium extrusion 6061 T6*, sedangkan untuk kompoen *main support beam* dan *end center sill* menggunakan SPA-H (JIS G 3125). Material Al 6061-T6 merupakana material aluminium yang sering digunakan pada kontruksi pesawat terbang, namun dikarenakan material *Aluminium extrusion 6061 T6* terlalu kaku jika digunakan pada kontruksi *carboday* kereta LRT, maka pada penelitian ini material *Aluminium extrusion 6061 T6* akan dibandingkan dengan material *Aluminium extrusion 6005A-T6*.

Aluminium 6061-T6 mempunyai kelebihan seperti kekuatan tarik relatif tinggi, sifat *formability* yang baik, tahan korosi dan merupakan logam ringan. Kelemahan Al 6061-T6

adalah sifat mampu las (*weldability*) relatif rendah dan sambungan las rentan terhadap kegagalan. Tabel *material properties* dari Aluminium 6061-T6 ditunjukkan pada Tabel 3.1. Data *material properties* ini didukung oleh *Material Properties Database* dari *website MakeItForm.com* yang didapatkan dari data publikasi standarisasi, dokumentasi *supplier* dan studi literatur.

**Tabel 3.1** *Material Properties* Aluminium 6061-T6

<b>Properties</b>	<b>Constants</b>	<b>Dimension</b>
Density	2700	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Yield Strength	275	MPa
Tensile Ultimate Strength	310	MPa
Young's Modulus	69	GPa
Poisson's Ratio	0,33	
Fatigue Stress	95	MPa
Shear Modulus	26	GPa
Modulus of Resilience	520	kJ/m <sup>3</sup>

*Aluminium extrusion* 6005A-T6 merupakan material *Aluminium* dengan kekuatan sedang, dan memiliki ketahanan korosi yang sangat baik. *Aluminium extrusion* 6005A-T6 memiliki sifat antara *Aluminium extrusion* 6061 dan 6082. Material ini memiliki karakteristik ekstrusi yang lebih baik dan permukaan akhir yang lebih baik. Sulit untuk menghasilkan ekstrusi tipis atau kompleks pada *Aluminium extrusion* 6005A-T6, tetapi masih lebih baik dari *Aluminium extrusion* 6082. Tabel *material properties* dari Aluminium 6005A-T6 ditunjukkan pada Tabel 3.2. Data *material properties* ini didukung oleh *Material Properties Database* dari *website MakeItForm.com* yang didapatkan dari data publikasi standarisasi, dokumentasi *supplier* dan studi literatur.

**Tabel 3.2** *Material Properties* Aluminium 6005A-T6

<b>Properties</b>	<b>Constants</b>	<b>Dimension</b>
Density	2700	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Yield Strength	230	MPa
Tensile Ultimate Strength	280	MPa
Young's Modulus	69	GPa
Poisson's Ratio	0,33	
Fatigue Stress	88	MPa
Shear Modulus	26	GPa
Modulus of Resilience	370	kJ/m <sup>3</sup>

**Tabel 3.3** *Material Properties* SPA-H (JIS G 3125)

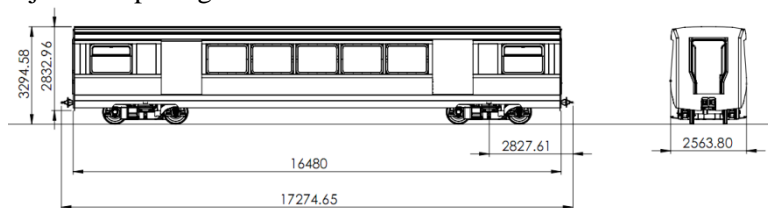
<b>Properties</b>	<b>Constants</b>	<b>Dimension</b>
Density	7700	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Yield Strength	355	MPa
Tensile Ultimate Strength	490	MPa
Young's Modulus	200	GPa
Poisson's Ratio	0,32	
Fatigue Stress	142	MPa
Shear Modulus	75758	MPa
Bulk Modulus	185190	MPa

SPA-H (JIS G 3125) merupakan baja dengan karakteristik ketahanan terhadap korosi yang baik dan memiliki kekuatan tarik yang baik pula sehingga lebih sering dikenal dengan nama *Corten Steel* (*Corrosion Resistance – Tensile Strength*). Bahkan *Corten Steel* diklaim memberikan 30% peningkatan sifat mekanik dan lebih tahan cuaca 4 - 8 kali lebih baik daripada baja karbon konvensional. Pada dasarnya ada dua jenis *Corten Steel* yang paling umum, yakni *Corten A* dan *Corten-B*. *Corten B*, banyak

digunakan sebagai kontainer, cerobong asap, konstruksi kereta api dan baja outdoor lainnya. Tabel *material properties* dari SPA-H (JIS G 3125) ditunjukkan pada Tabel 3.3. Data *material properties* SPA-H ini sesuai dengan EN 10025-5, yang didapatkan dari referensi *Supplier Trading Plate, distributor plate Indonesia* ([Corten Steel SPA-H JIS G3125 Equivalent A588%20%20 SUPPLIER TRADING PLATE.html](http://Corten%20Steel%20SPA-H%20JIS%20G3125%20Equivalent%20SUPPLIER%20TRADING%20PLATE.html)). Data ini sudah sesuai dengan material steel SPA-H yang digunakan di Indonesia, begitupun dengan data yang digunakan oleh PT. INKA.

### 3.2 Pembuatan Solid Model

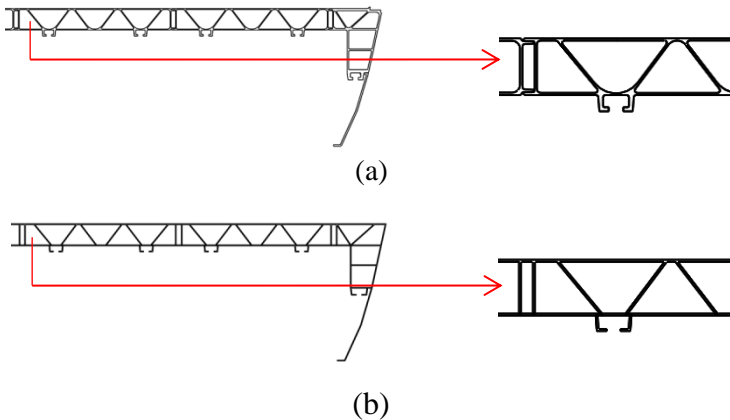
Pembuatan model desain 3D adalah proses menggambar bentuk tiga dimensi objek penelitian, proses dilakukan dengan menggunakan *software* Solidworks 2016 *Premium*. Solidworks merupakan perangkat lunak CAD (*Computer Aided Design*) yang digunakan untuk perancangan dua dimensi maupun tiga dimensi. Bagian yang dimodelkan adalah *carbody* kereta LRT Palembang. Untuk ukuran dimensi konstruksi *carbody* kereta LRT Palembang dijelaskan pada gambar 3.3.



**Gambar 3.3** Dimensi *Trailer Car* Kereta LRT Palembang

Pada penelitian ini, model *carbody* kereta LRT Palembang yang akan disimulasikan disederhanakan dari model sesungguhnya. Penyederhanaan pada model ini diantaranya area *fillet* dihilangkan, dan komponen komponen seperti kursi, AC, dan lainnya yang bukan termasuk komponen utama dari *carbody*

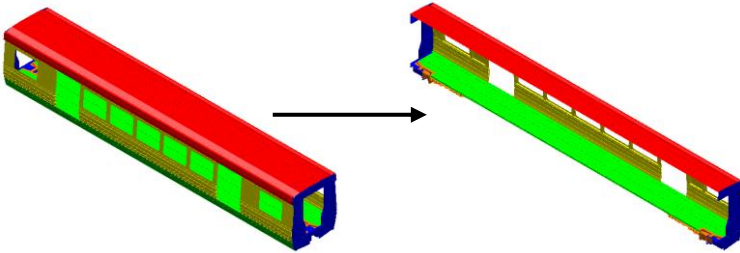
dihilangkan dan dimodelkan dengan pembebanan dari komponen tersebut.



**Gambar 3.4** Perbandingan Komponen;  
 (a). Komponen dengan pemberian *Fillet*;  
 (b). Komponen tanpa pemberian *Fillet*

Area *fillet* yang dihilangkan dapat dilihat pada gambar 3.4. Dikarenakan ada perubahan geometri dengan menghilangkan area *fillet*, maka tegangan yang terjadi pada hasil simulasi harus dikalikan dengan faktor konsentrasi tegangan. Sehingga pada penelitian ini dilakukan proses perhitungan numerik dengan membandingkan tegangan pada komponen yang diberikan *fillet* dengan tegangan yang terjadi komponen tanpa *fillet* untuk mendapatkan faktor pengali pembanding pada simulasi akhir. Penghilangan area *fillet* dilakukan lebih mudah mendapatkan hasil *meshing* yang terstruktur dengan bentuk kotak secara dominan. Penghilangan komponen-komponen selain komponen utama *carbody* bertujuan agar jumlah *element* maupun *node* pada hasil *meshing* tidak begitu banyak, sehingga proses simulasi dalam menyelesaikan masalah lebih cepat mendapatkan solusi.





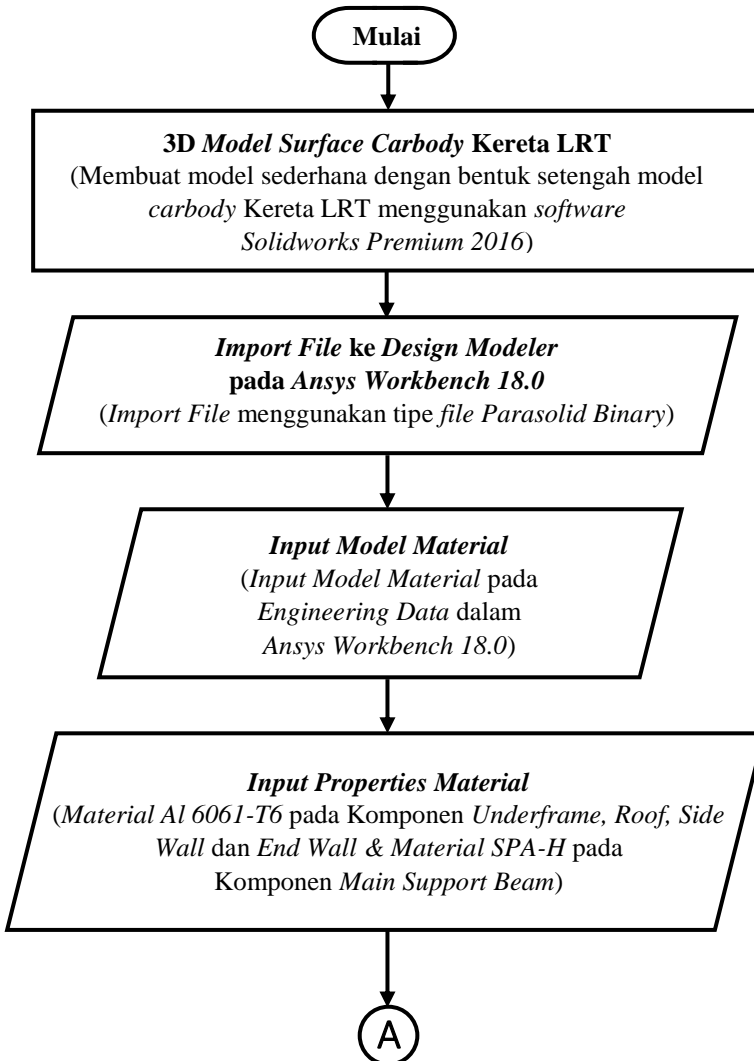
**Gambar 3.5** Penyederhanaan Model; (a). Model *Carbody* utuh; (b). Model *Carbody* dipotong setengah.

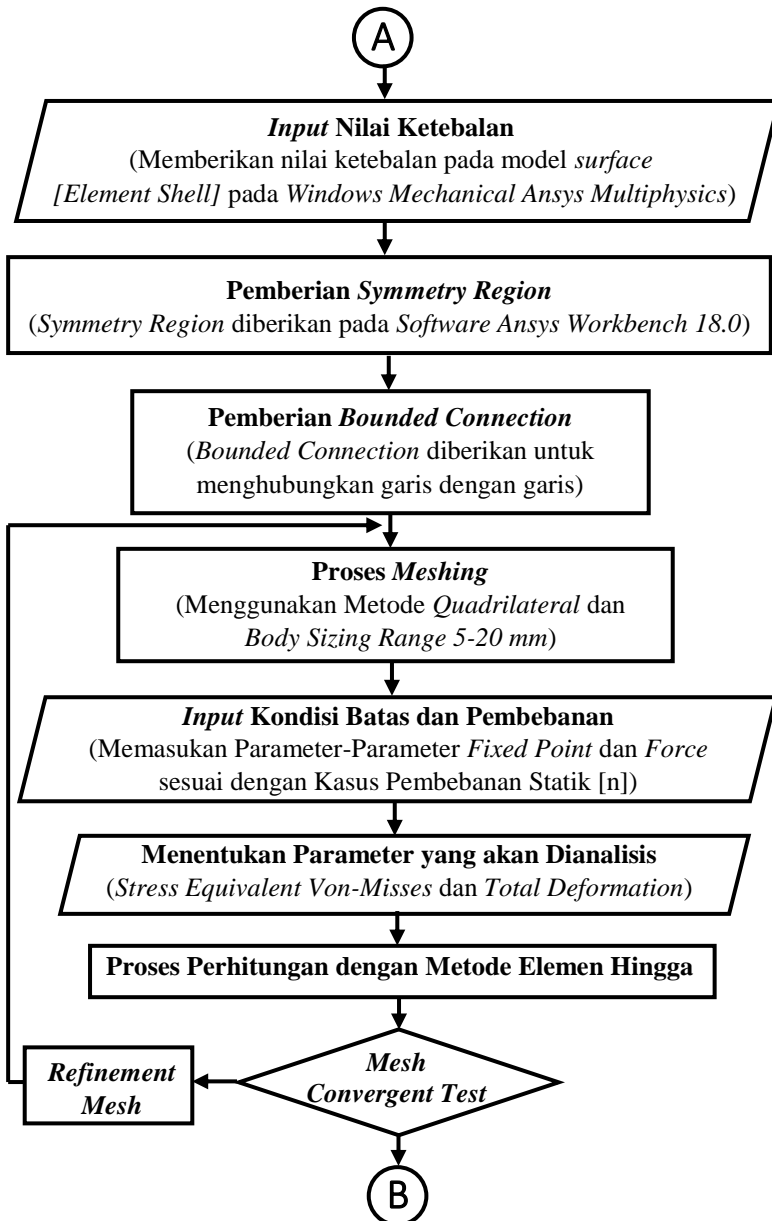
Untuk memudahkan dalam proses perhitungan numerik, jumlah elemen yang dihasilkan pada proses diskritisasi diturunkan. Agar tidak mempengaruhi *mesh convergent test* maka untuk mereduksi jumlah elemen yang akan dihasilkan, dilakukan penyederhanaan dengan memotong model menjadi setengah bagian yang ditunjukkan pada gambar 3.5. Sehingga pada proses analisis numerik ditambahkan metode pemberian *symmetry region* pada garis potongan yang membagi model menjadi setengah bagian, agar hasil simulasi menyerupai dengan keadaan model *carbody* kondisi utuh.

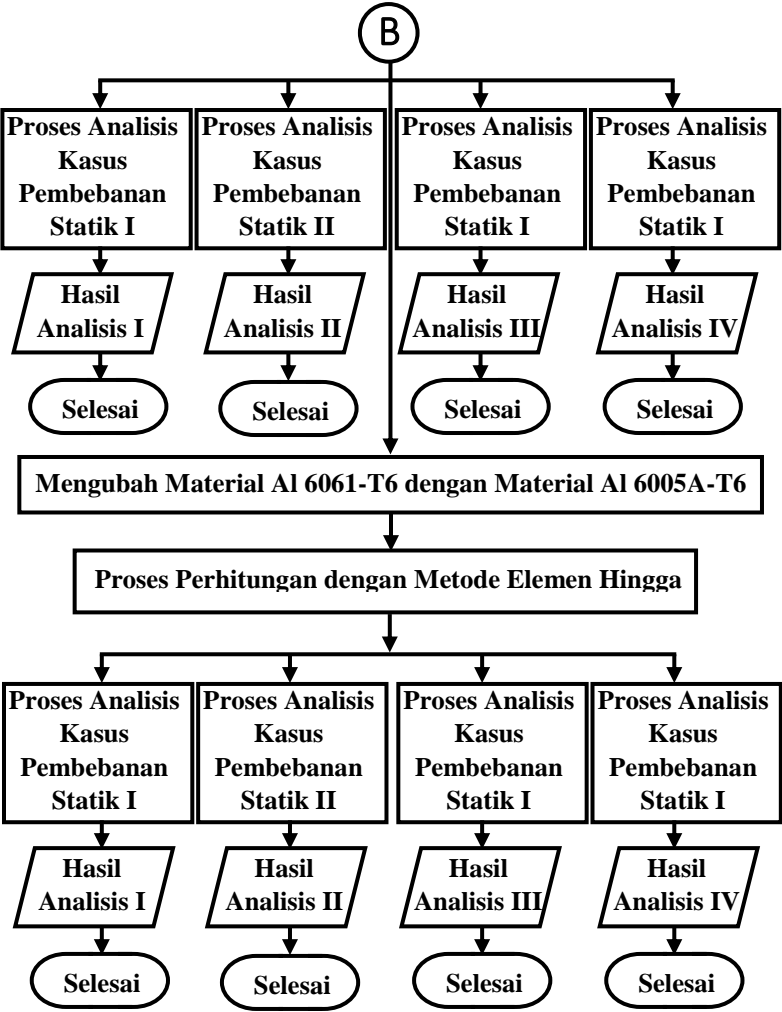
Pada penelitian ini, *element* yang digunakan adalah *element shell* sehingga *carbody* harus dimodelkan dengan model 3D *surface*. Langkah awal yang dilakukan adalah menggambar ulang model *carbody* dari model *solid* menjadi *surface*. Dikarenakan *carbody* ini terdiri dari beberapa komponen, untuk memudahkan dalam pemodelan pada *software Solidworks 2016 Premium* maka model tersebut dimodelkan pada dokumen *assembly*. Sehingga dalam proses pembuatan model *part surface* difokuskan pada setiap komponen utama, agar pemodelan lebih mudah dilakukan. Dikarenakan model *part* berupa *surface*, data ketebalan pada setiap *part surface* menjadi sangat penting dalam penelitian ini, maka dari itu untuk data ketebalan tiap *part surface* sudah dilampirkan pada lampiran 1. Untuk memudahkan proses

*import geometry*, model 3D *surface* disimpan dengan tipe *file parasolid binary (.x\_b)*.

### 3.3 Model Elemen Hingga







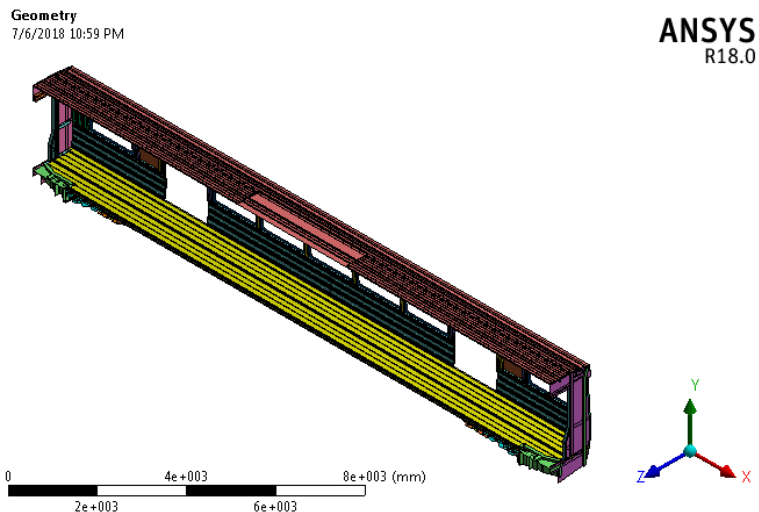
**Gambar 3.6** Flowchart Penelitian Metode Elemen Hingga

Pengerjaan tugas akhir ini dimulai dengan memodelkan ulang 3D model *carbody* Kereta LRT menjadi model yang sederhana, agar lebih mudah pada proses analisa simulasi statik struktural. Model sederhana ini selanjutnya dimodelkan dengan

elemen *shell* pada software *Solidworks 2016 Premium* dengan model *surface*. Kemudian dilakukan proses analisa statik struktural dengan menggunakan metode elemen hingga yang meninjau distribusi tegangan dan total deformasi yang terjadi seperti terlihat pada *flowchart* gambar 3.6.

### 3.3.1 Model *Carbody* Kereta LRT

Pemodelan yang dipilih dalam simulasi ini adalah *static structural*, analisa *static structural* digunakan untuk mengetahui kekuatan serta mengetahui kondisi kritis yang dimiliki struktur yang dianalisis. Kondisi kritis merupakan kondisi dimana kegagalan dari struktur paling mungkin terjadi dan dapat tercapai karena pada kondisi tersebut terdapat tegangan maksimum yang dialami struktur tersebut .



**Gambar 3.7** Model Setengah *Carbody*

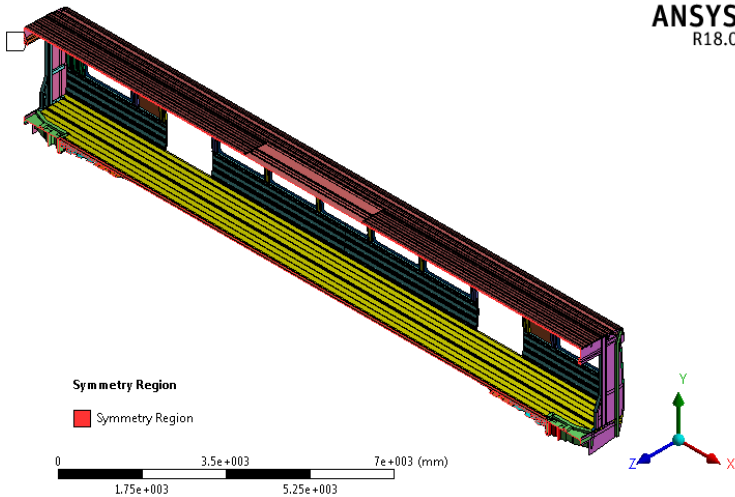
Pembuatan model simulasi dilakukan dengan *Design Modeler*. Langkah pertama adalah *import geometry* dari 3D model *surface carbody* kereta LRT yang telah dibuat

menggunakan *software Solidworks 2016 Premium* dengan tipe *file import Parasolid Binary*. Menggunakan tipe *file Parasolid Binary* akan memudahkan dalam transfer model dari *software Solidworks* ke *software Ansys*, karena nama dari komponen yang dibuat menggunakan *software Solidworks 2016 Premium* akan terdeteksi pada saat di-*import* ke *software Ansys*.

Ketika model *surface carbody* kereta LRT yang telah di-*import*-kan masuk ke dalam *Design Modeler Ansys*, model *surface* akan terdeteksi sebagai *element shell*, sehingga dibutuhkan data ketebelan untuk tiap komponen model *carbody* agar dapat melakukan proses diskritisasi. Data ketebalan komponen model *carbody* kereta LRT terdapat pada lampiran 2.

### 3.3.2 Symmetry Region

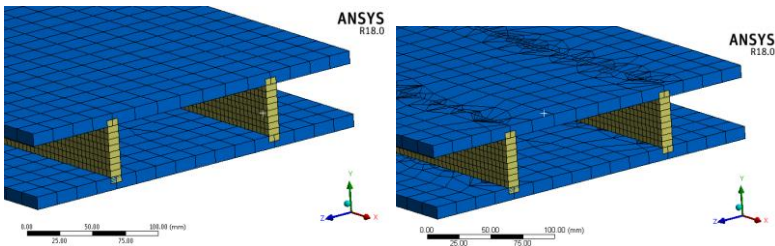
Pendefinisian *Symmetry Region* dalam prosedur MEH merupakan suatu kondisi batas dimana diluar bidang perpindahan (*displacement*) dan didalam bidang rotasi ditetapkan pada titik nol. Pemberian *symmetry region* dapat diberikan pada suatu model dengan kondisi batas pembebanan dan tumpuan dapat dianggap simetris. Pada penelitian ini, pembebanan pada *carbody* LRT dapat dianggap simetris terhadap bidang XY jika dilihat pada gambar 3.8. karena pembebanan yang diberikan hanya terdapat pada sumbu X dan Y. Begitu juga dalam kondisi batas tumpuan, ketika kita memotong menjadi setengah bagian model, tumpuan tersebut masih dapat digunakan dengan kondisi setengah bagian sehingga kondisi ini dapat diberikan kondisi batas *symmetry region*. Dengan diberikannya metode *symmetry region*, bentuk geometri model menjadi lebih berkurang dari kondisi awal, sehingga jumlah elemen pada proses diskritisasi dapat dimaksimalkan sesuai dengan kemampuan *hardware* dalam proses perhitungan numerik dengan menggunakan *software Ansys Workbench 18.0*. Pemberian metode *symmetry region* dijelaskan pada gambar 3.8.

ANSYS  
R18.0

**Gambar 3.8** Pemberian *Symmetry Region*

### 3.3.3 Bounded Connection

*Bounded Connection* merupakan suatu metode penggabungan antara satu *part* dengan *part* yang lainnya secara terikat. Metode ini digunakan untuk menghasilkan *meshing* yang lebih terstruktur dibandingkan dengan metode *mesh connection*.



(a)

(b)

**Gambar 3.9** Perbandingan hasil *mesh*

(a). Metode *Bounded Connection*, (b). Metode *Mesh Connection*

Pada metode *mesh connection*, untuk menghasilkan bentuk *mesh* yang terstruktur harus diberikan *sizing* dengan nilai yang sama, sehingga ketika nilai *sizing* berbeda jauh akan menghasilkan *mesh* yang tidak terstruktur. Namun dengan metode *bounded connection*, meskipun nilai *sizing* berbeda, tetap menghasilkan bentuk *mesh* yang terstruktur. Gambar 3.9 menunjukkan perbandingan antara metode *bounded connection* dengan *mesh connection*. Dikarenakan elemen yang digunakan pada analisis ini merupakan elemen *shell* maka secara menyeluruh *bounded connection* yang diberikan antara suatu garis ke garis yang lain.

### 3.3.4 Diskritisasi

*Meshing* adalah proses pembagian *body* menjadi elemen-elemen yang lebih kecil. Proses ini sangat mempengaruhi hasil dari simulasi. Oleh karena itu *meshing* harus dilakukan dengan jenis dan jumlah elemen yang sesuai dengan kebutuhan. Pada penelitian ini elemen yang diaplikasikan adalah elemen *shell* dengan ketebalan sesuai komponennya. Proses *meshing* yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan metode *Quadrilateral Dominant* sehingga hasil *meshing* memiliki bentuk yang terstruktur. Dengan metode *bounded connection*, jumlah bentuk elemen *mesh* yang tidak terstruktur berkurang, sehingga dengan bentuk *mesh* yang terstruktur akan menghasilkan *result* yang akurat.

*Mesh convergent test* merupakan suatu metode pengujian untuk mengetahui jumlah *element mesh* yang optimal untuk digunakan dalam proses perhitungan dengan metode elemen hingga (menggunakan *software*). *Mesh convergent test* sangat penting dalam metode elemen hingga, dikarenakan dengan analisa *mesh convergent test* akan didapatkan jumlah *element mesh* yang optimal sehingga hasil data yang didapatkan lebih valid dengan proses perhitungan *software* yang tidak begitu berat. Proses penambahan jumlah *node mesh* dan *element mesh* dengan



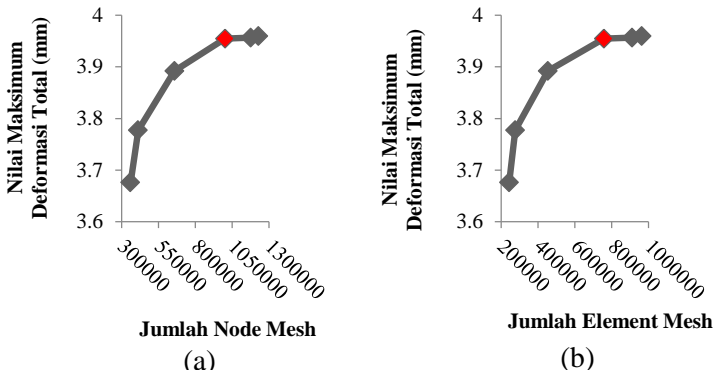
cara mengatur nilai dari *body sizing* pada proses *meshing*. Semakin kecil nilai *body sizing* yang diberikan, semakin besar nilai jumlah *node mesh* dan *element mesh* yang dihasilkan. Pada penelitian ini didapatkan data simulasi untuk *Mesh Convergent Test* seperti pada tabel 3.4. Hasil data pada tabel 3.4 dapat dilihat pada lampiran 3.

**Tabel 3.4** Data Hasil Simulasi *Mesh Convergent Test*

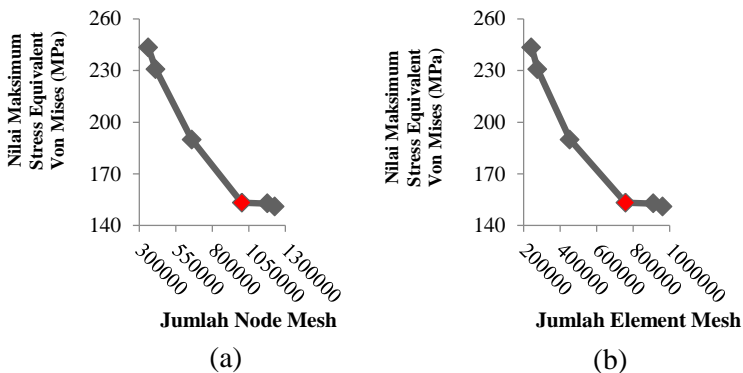
Data	Node	Element	Element Quality	Total Deformation (mm)	Max Equivalent Stress Von-Mises (MPa)	Position of Max Equivalent Stress Von-Mises
1	361245	243536	83.16%	3.6761	243.35	Balok Penyangga
2	412831	276682	84.30%	3.7772	230.64	Balok Penyangga
3	659315	454008	88.04%	3.892	189.87	Balok Penyangga
4	1001560	757471	91.368%	3.9546	153.31	Balok Penyangga
5	1177578	910356	91.405%	3.9563	152.72	Balok Penyangga
6	1227716	961345	92.372%	3.95942	151.01	Balok Penyangga

Data pada tabel 3.4 ini menggunakan kondisi batas kasus IV dengan pembebanan vertikal dengan kondisi penumpang penuh, pembebanan kompresi dan tarik, dan pembebanan komponen. Semakin banyak jumlah *node mesh* dan *element mesh* yang dihasilkan, semakin baik kualitas mesh yang didapatkan. Pada tabel 3.4 didapatkan bahwa data ke-4 memiliki jumlah *node* dan *element mesh* yang optimal dan menghasilkan hasil yang akurat dari proses perhitungan dengan metode elemen hingga. Hal ini dapat dilihat pada gambar 3.10 yang menunjukkan bahwa

hasil data ke-4 hingga data ke-6 menghasilkan nilai deformasi total maksimum sebesar  $\pm 3.95$  mm yang dapat dikatakan stabil atau menunjukkan hasil yang konsisten dengan bertambahnya jumlah *node mesh* dan *element mesh*.

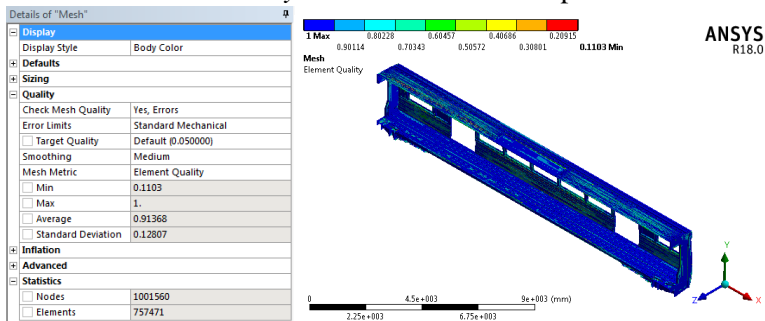


**Gambar 3.10** (a). Grafik jumlah *node mesh* terhadap nilai maksimum deformasi total, (b). Grafik jumlah *elemnt mesh* terhadap nilai maksimum deformasi total



**Gambar 3.11** (a) Grafik jumlah *node mesh* terhadap nilai maksimum *stress von-mises*, (b) Grafik jumlah *element mesh* terhadap nilai maksimum *stress von-mises*

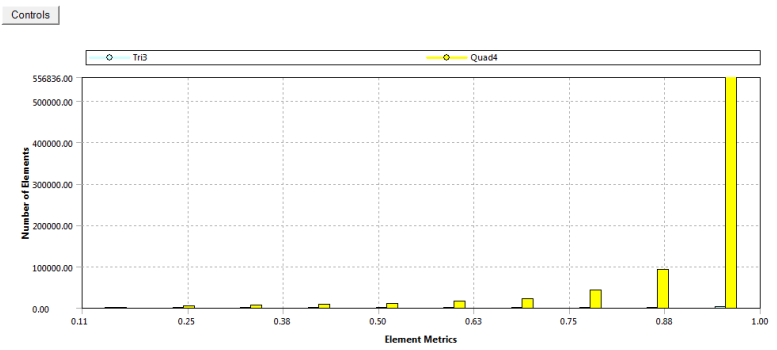
Data ke-4 memiliki kualitas *mesh* dengan nilai 91.368% dengan bentuk *quad* (terstruktur). Grafik kualitas mesh dapat dilihat pada lampiran 3. Begitu juga pada gambar 3.11 yang menunjukkan bahwa hasil data ke-4 hingga data ke-6 menghasilkan nilai *equivalent stress von-mises* maksimum sebesar  $\pm 153$  MPa yang dapat dikatakan stabil atau menunjukkan hasil yang konsisten dengan bertambahnya jumlah *node mesh* dan *element mesh*. Sehingga data ke-4 akan dijadikan sebagai acuan jumlah *node mesh* dan *element mesh* dalam melakukan proses perhitungan metode elemen hingga selama model konstruksi *carbody* kereta LRT tidak ada perubahan.



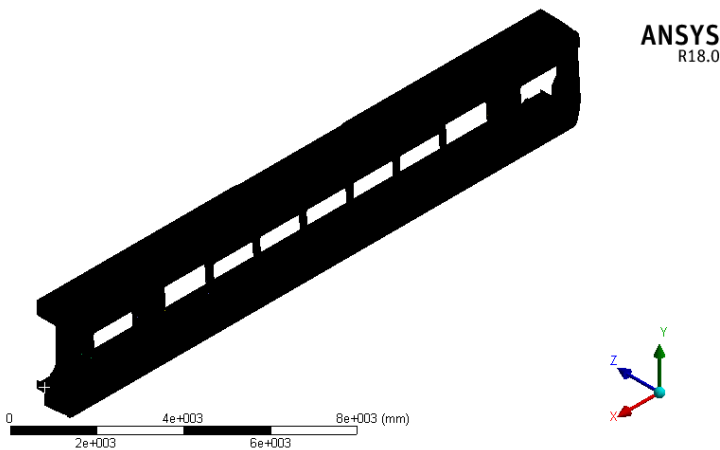
**Gambar 3.12** *Mesh Quality*

Dikarenakan pada penelitian ini tidak melakukan variasi model, sehingga hasil *mesh* data ke-4 yang memiliki jumlah *node mesh* sebesar 1001560 dan jumlah *element mesh* sebesar 757471 digunakan untuk pengambilan data analisis kasus pembebanan I, II, III, dan IV. Karena kasus pembebanan I, II, III, dan IV menggunakan model konstruksi *carbody* yang sama, yang membedakan pada kondisi batas pembebanannya. Gambar 3.12 menunjukkan hasil kualitas dari *meshing* yang telah diberikan. Rata-rata *mesh quality* yang memiliki bentuk *quad* (terstruktur) sebesar 91.368%. Nilai rata-rata ini dijadikan sebagai acuan dalam menentukan kualitas bentuk struktur *meshing*. Dari grafik *mesh quality* pada gambar 3.13 menunjukkan bahwa *element*

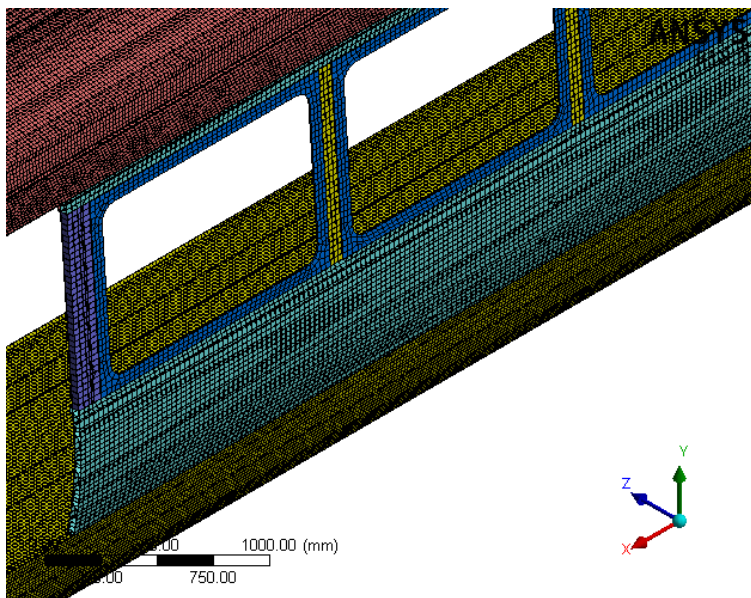
dengan jumlah 556836 memiliki bentuk *quad*  $\pm 96\%$  sempurna, dan untuk *element* dengan bentuk *tri* (tidak terstruktur) memiliki jumlah yang sangat sedikit dengan melihat grafik tipisnya batang yang menunjukkan jumlah *element tri*. Untuk detail hasil *meshing* pada tiap komponen dapat dilihat pada lampiran 4.



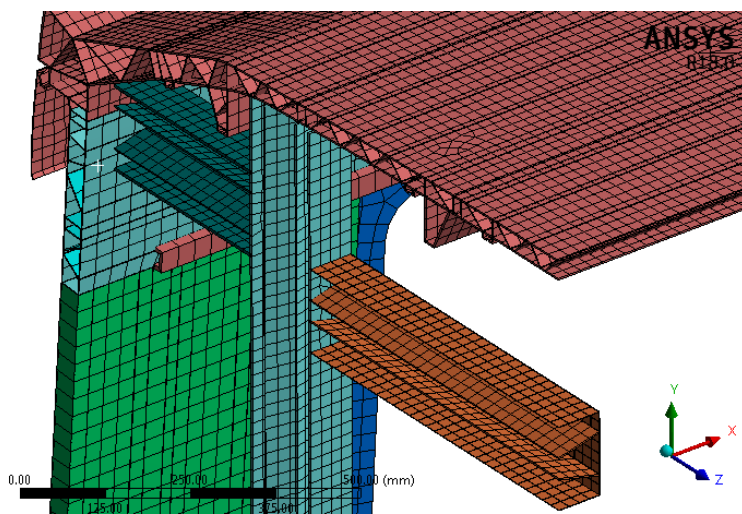
Gambar 3.13 Grafik *Mesh Quality*



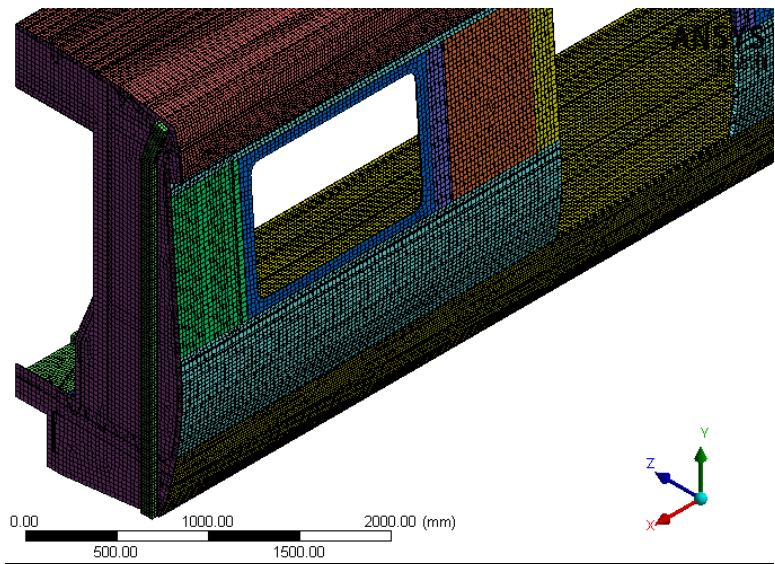
Gambar 3.14 Hasil *Meshing*



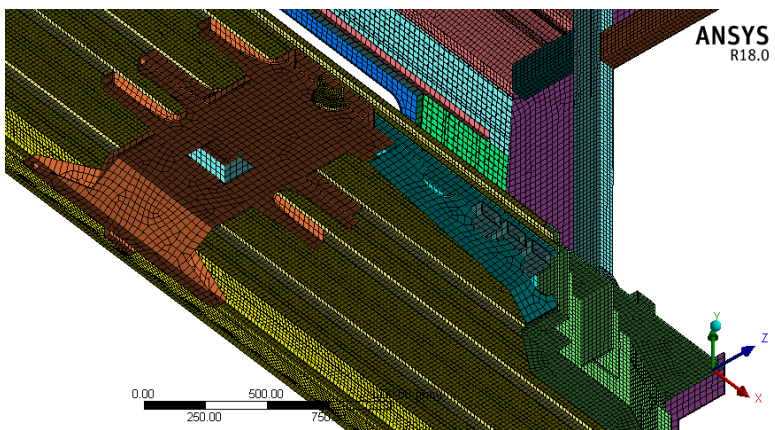
(a)



(b)



(c)

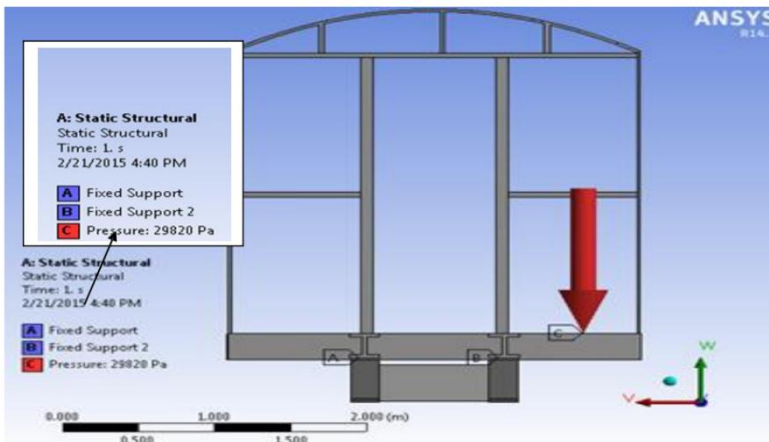


(d)

**Gambar 3.15** Detail Hasil *Meshing* : (a). *Side Wall*, (b). *Rangka End Wall* dan *Profil Ekstrusi Roof*. (c). *End wall*, (d). *Main Support Beam*,

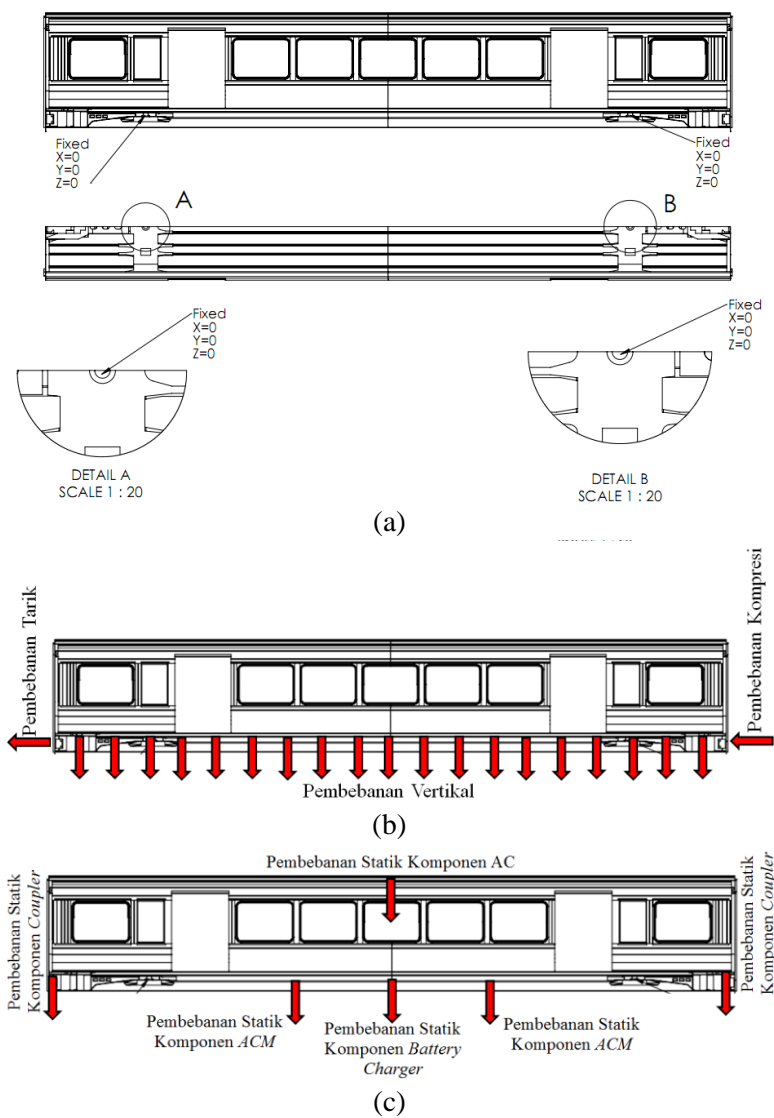
### 3.4 Kondisi Batas dan Pembebanan

Kondisi batas (*boundary condition*) model ditunjukkan pada gambar 3.17.a oleh koordinat Kartesian, di mana X, Y, dan Z adalah arah horizontal, vertikal dan lateral. Pada bagian bawah dari komponen *main support beam* yang bertumpu pada bagian *spring bogie* diberikan *displacement* pada arah  $x = 0$  (*fixed*),  $y = 0$  (*fixed*) dan  $z = 0$  (*fixed*) sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Baykasoglu et al (2012) dan penelitian Belete Jirru (2015). Karena pada penelitian Baykasoglu et al, analisa perhitungan metode elemen hingga divalidasi dengan melakukan eksperimen, sehingga kondisi batas tumpuan *fixed* dapat dijadikan sebagai acuan dalam penelitian ini



**Gambar 3.16** Kondisi batas tumpuan *fixed* pada analisis Belete Jirru

Begitu juga dalam penelitian Belete Jirru, kondisi batas tumpuan yang digunakan adalah tumpuan *fixed*, seperti pada gambar 3.16. Kondisi batas tersebut berlaku untuk dua *main support beam*, baik yang depan maupun yang belakang.



**Gambar 3.17** (a) Kondisi Batas, (b) Pembebanan Utama, (c) Pembebanan Komponen



Pembebanan utama pada model diterapkan pada permukaan *underframe* bagian atas sebagai pembebanan vertikal, pada bagian dudukan *coupler* pada daerah *end center sill* sebagai beban kompresi, dan pada bagian dudukan *coupler* lainnya sebagai beban tarik, seperti yang digambarkan oleh gambar 3.17.b. Pembebanan lainnya yang terdiri dari beban statik komponen AC (*Air Conditioning*), ACM (*Auxiliary Control Module*), *Coupler* dan *Battery Charger* ditunjukkan pada gambar 3.17.c.

Pembebanan terhadap *carbody* kereta LRT terdiri dari:

- Beban Kompresi longitudinal pada alat perangkai minimum sebesar 400 kN, merupakan beban statis yang dikenakan pada peralatan perangkai, diperhitungkan bersama atau tanpa beban vertikal (*Data ini didapatkan dari Standarisasi EN-12663-1:2010*);  
Beban Kompresi = 400 kN.
- Beban Tarik longitudinal pada alat perangkai minimum sebesar 300 kN, merupakan beban statis yang dikenakan pada peralatan perangkai, diperhitungkan bersama atau tanpa beban vertikal (*Data ini didapatkan dari Standarisasi EN-12663-1:2010*);  
Beban Kompresi = 300 kN.
- Beban vertikal diperhitungkan berdasarkan formula sebagai berikut:  
(*Formulasi perhitungan ini didapatkan dari Standarisasi EN-12663-1:2010*)

$$P_v = k (P_1 + P_2)$$

$P_v$  = beban vertikal

$K$  = 1,3 (koefisien dinamis)

$P_1$  = berat badan kereta dalam keadaan siap operasi

$P_2$  = jumlah penumpang x 57.7 kg

(Data berat orang Asia sesuai dengan artikel “*The weight of nations: an estimation of adult human biomass*” terlampir pada lampiran 5.)

Jumlah penumpang = jumlah tempat duduk + jumlah penumpang berdiri (setiap luasan  $m^2 = 8$  orang)

1. Pembebanan pada kondisi tanpa penumpang

$$P_v = 1.3 (18600\text{kg} + 0\text{kg}) = 24180 \text{ kg}$$

$$W = P_v \times g, \quad \text{dengan asumsi } g = 10 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Beban Vertikal tanpa penumpang} = 241800 \text{ N} = 241.8 \text{ kN}$$

2. Pembebanan pada kondisi penuh penumpang

$$P_v = 1.3 (18600\text{kg} + 12982.5\text{kg}) = 41057.25 \text{ kg}$$

$$W = P_v \times g, \quad \text{dengan asumsi } g = 10 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Beban Vertikal penuh penumpang} = 410572.5 \text{ N}$$

$$= 410.5725 \text{ kN}$$

**Tabel 3.5** Pembebanan Komponen

No	Komponen	Berat (kg)	Beban (N)
1	AC ( <i>Air Conditioning</i> )	870	8700
2	ACM ( <i>Auxiliary Control Module</i> )	1100	11000
3	<i>Coupler</i>	181	1810
4	<i>Battery Charger</i>	200	2000

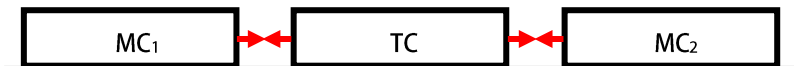
- Beban komponen merupakan beban dari komponen yang memiliki pengaruh besar terhadap deformasi yang terjadi pada kontruksi *carbody* kereta LRT. Pembebanan komponen terdiri dari beban AC (*Air Conditioning*), ACM (*Auxiliary Control Module*), *Coupler*, dan *Battery Charger* dijelaskan pada Tabel 3.5.

- Beban Kompresi dan Beban Tarik Aktual didapatkan dari perhitungan manual dengan data penunjang dalam kondisi aktual.



**Gambar 3.18** Gambaran Umum Kereta LRT Palembang

Pada gambar 3.18 menunjukkan bahwa kereta LRT Palembang terdiri dari 3 *Carbody*, yaitu *MotorCar 1*, *Trailer Car*, dan *MotorCar 2*. Pada setiap *carbody* menerima gaya pembebanan vertikal yang berbeda. Untuk mempermudah perhitungan dinamika, model *free body diagram* disederhanakan seperti pada gambar 3.19.



**Gambar 3.19** *Free Body Diagram*

Data pada Tabel 3.6 merupakan data berat pada *MotorCar* dan *TrailerCar* Kereta LRT Palembang.

**Tabel 3.6** Data Berat *MotorCar* dan *TrailerCar* pada Kereta LRT Palembang

No	Komponen	Berat (ton)	Simbol
1	<i>Motor Carbody</i> (tanpa <i>Bogie</i> )	18	$M_{MC}$
2	<i>Trailer Carbody</i> (tanpa <i>Bogie</i> )	19	$M_{TC}$
3	<i>Bogie</i>	4.5	$M_B$
4	Penumpang Penuh pada <i>Trailer Carbody</i>	13	$M_{PTC}$
5	Penumpang Penuh pada <i>Motor Carbody</i>	12	$M_{PMC}$

Keterangan :

$M_{MC}$  : Massa *Motor Carbody*

$M_{TC}$  : Massa *Trailer Carbody*

$M_B$  : Massa *Bogie*

$M_{PTC}$  : Massa Penumpang *Motor Carbody*

$M_{PMC}$  : Massa Penumpang *Trailer Carbody*

- Berat Total *Motor Carbody* :

$M_C$  : Berat total *Motor Carbody*

$$M_C = M_{MC} + 2 M_B + M_{PMC}$$

$$M_C = (18) + 2 (4.5) + (12) = \mathbf{39 \text{ ton}}$$

- Berat Total *Trailer Carbody* :

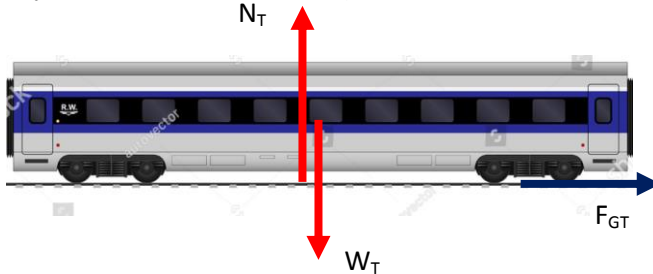
$M_T$  : Berat total *Trailer Carbody*

$$M_T = M_{TC} + 2 M_B + M_{PTC}$$

$$M_T = (19) + 2 (4.5) + (13) = \mathbf{41 \text{ ton}}$$

### Gaya Normal dan Gaya Gesek

- Gaya Normal *Trailer Carbody*



**Gambar 3.20** *Free Body Diagram Trailer Carbody*

Keterangan :

$N_T$  : Gaya Normal *Trailer Carbody*

$W_T$  : Gaya Berat *Trailer Carbody*

$F_{GT}$  : Gaya Gesek pada *Trailer Carbody*

$$\sum F_y = 0$$

$$N_T - W_T = 0$$

$$N_T = W_T$$

$$N_T = M_T \times g, \quad g = 10 \text{ m/s}^2 \text{ (percepatan gravitasi)}$$

$$N_T = 41000 \text{ kg} \times 10 \text{ m/s}^2$$

$$N_T = \mathbf{410 \text{ kN}}$$

➤ Gaya Gesek pada *Trailer Carbody*

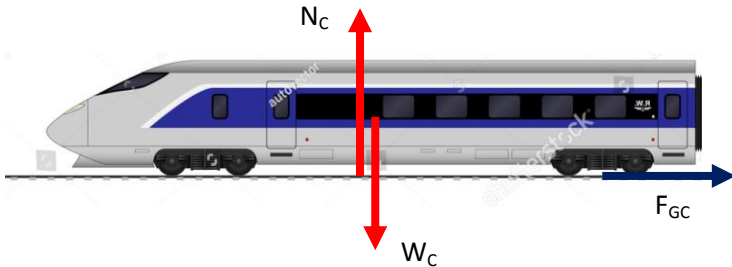
Berdasarkan referensi penelitian terdahulu, yang berjudul “*Measurements of friction coefficients between rails lubricated with a friction modifier and the wheels of an IORE locomotive during real working conditions*”, didapatkan bahwa nilai koefisien gesek rata-rata yang terjadi antara rel dan roda gerbong adalah 0.3, dengan kondisi rel kering tidak diberikan pelumas sama sekali. Hal ini sesuai dengan kondisi rel dan roda gerbong pada LRT ini. (Jan, 2015)

$$F_{GT} = \mu \times N_T \quad \mu = 0.3$$

$$F_{GT} = 0.3 \times 410 \text{ kN}$$

$$F_{GT} = 123 \text{ kN}$$

➤ Gaya Normal *Motor Carbody*



**Gambar 3.21** *Free Body Diagram Motor Carbody*

Keterangan :

$N_C$  : Gaya Normal *Motor Carbody*

$W_C$  : Gaya Berat *Motor Carbody*

$F_{GC}$  : Gaya Gesek pada *Motor Carbody*

$$\sum F_y = 0$$

$$N_C - W_C = 0$$

$$N_C = W_C$$

$$N_C = M_C \times g, \quad g = 10 \text{ m/s}^2 \text{ (percepatan gravitasi)}$$

$$N_C = 39000 \text{ kg} \times 10 \text{ m/s}^2$$

$$N_C = 390 \text{ kN}$$

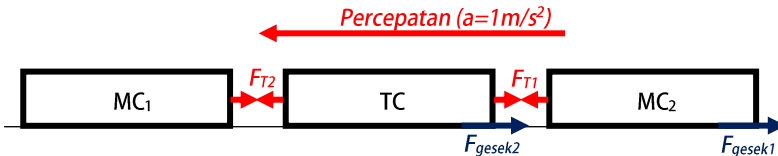
- Gaya Gesek pada *Motor Carbody*

$$F_{GC} = \mu \times N_C \quad \mu = 0.3$$

$$F_{GC} = 0.3 \times 390 \text{ kN}$$

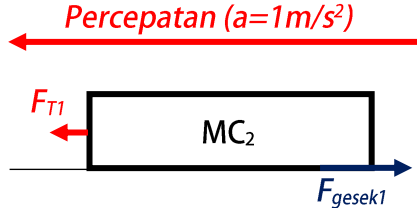
$$F_{GC} = 117 \text{ kN}$$

Mencari Nilai Beban Tarikan Maksimum pada Trailer Car dengan Kondisi Percepatan.



**Gambar 3.22** *Free Body Diagram* Kondisi Percepatan

Perhitungan Beban  $F_{T1}$  pada *Motor Carbody* 2 ( $MC_2$ )



**Gambar 3.23** *Free Body Diagram* pada *Motor Carbody* 2 Kondisi Percepatan

$$(\leftarrow +) \sum F_x = MC_2 a$$

$$F_{T1} - F_{gesek1} = MC_2 a$$

$$F_{T1} = F_{gesek1} + MC_2 a,$$

$$F_{gesek1} = F_{GC} = 117 \text{ kN}$$

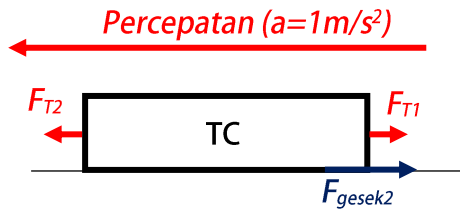
$$MC_2 = M_C = 39 \text{ ton}$$

$$F_{T1} = 117 \text{ kN} + 39000 \text{ kg} \times 1 \text{ m/s}^2$$

$$F_{T1} = 117 \text{ kN} + 39 \text{ kN}$$

$$F_{T1} = 156 \text{ kN}$$

Perhitungan Beban  $F_{T2}$  pada Trailer Carbody (TC)



**Gambar 3.24** *Free Body Diagram* pada Trailer Carbody  
Kondisi Percepatan

$$(\leftarrow +) \sum F_x = TC \cdot a$$

$$F_{T2} - F_{T1} - F_{gesek2} = TC \cdot a$$

$$F_{T2} = F_{T1} + F_{gesek2} + TC \cdot a, \quad F_{gesek2} = F_{GT} = 123 \text{ kN}$$

$$TC = M_T = 41 \text{ ton}$$

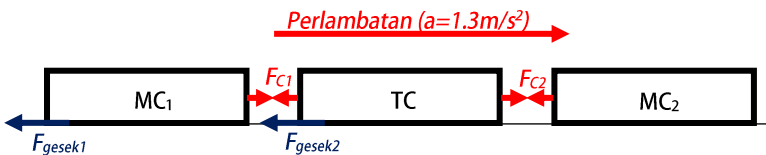
$$F_{T2} = 156 \text{ kN} + 123 \text{ kN} + 41000 \text{ kg} \times 1 \text{ m/s}^2$$

$$F_{T2} = 156 \text{ kN} + 123 \text{ kN} + 41 \text{ kN}$$

$$F_{T2} = \mathbf{320 \text{ kN}}$$

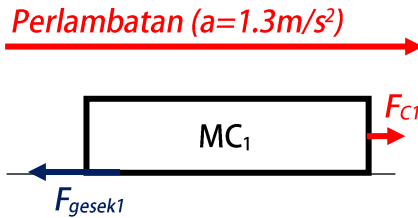
Didapatkan nilai Gaya Tarik maksimum pada *Trailer Carbody* sebesar 320 kN dengan kondisi percepatan 1 m/s<sup>2</sup>.

Mencari Nilai Beban Kompresi Maksimum pada Trailer Car dengan Kondisi Perlambatan.



**Gambar 3.25** *Free Body Diagram* Kondisi Perlambatan

Perhitungan Beban  $F_{C1}$  pada Motor Carbody 1 (MC<sub>1</sub>)



**Gambar 3.26** *Free Body Diagram* pada Motor Carbody  
1 Kondisi Perlambatan

$$(\rightarrow +) \sum F_x = MC_1 a$$

$$F_{C1} - F_{gesek1} = MC_1 a$$

$$F_{C1} = F_{gesek1} + MC_1 a,$$

$$F_{gesek1} = F_{GC} = 117 \text{ kN}$$

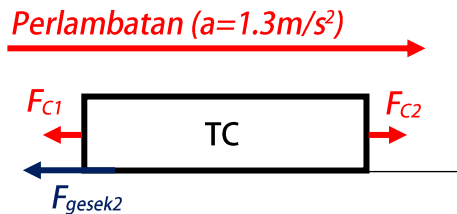
$$MC_1 = M_C = 39 \text{ ton}$$

$$F_{C1} = 117 \text{ kN} + 39000 \text{ kg} \times 1.3 \text{ m/s}^2$$

$$F_{C1} = 117 \text{ kN} + 50.7 \text{ kN}$$

$$F_{C1} = \mathbf{167.7 \text{ kN}}$$

Perhitungan Beban  $F_{C2}$  pada Trailer Carbody (TC)



**Gambar 3.27** *Free Body Diagram* pada Trailer Carbody  
Kondisi Perlambatan

$$(\rightarrow +) \sum F_x = TC a$$

$$F_{C2} - F_{C1} - F_{gesek2} = TC a$$

$$F_{C2} = F_{C1} + F_{gesek2} + TC a,$$

$$F_{gesek2} = F_{GT} = 123 \text{ kN}$$

$$TC = M_T = 41 \text{ ton}$$

$$F_{C2} = 167.7 \text{ kN} + 123 \text{ kN} + 41000 \text{ kg} \times 1.3 \text{ m/s}^2$$



$$F_{C2} = 167.7 \text{ kN} + 123 \text{ kN} + 53.3 \text{ kN}$$

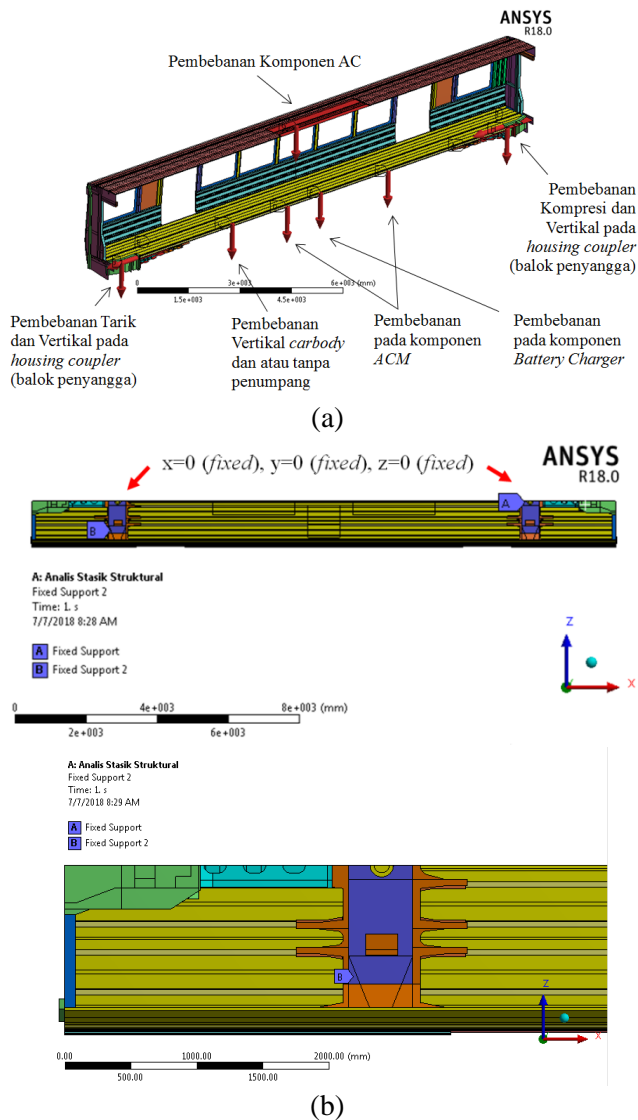
$$F_{C2} = \mathbf{344 \text{ kN}}$$

Didapatkan nilai Gaya Kompresi maksimum pada *Trailer Carbody* sebesar 344 kN dengan kondisi perlambatan 1.3 m/s<sup>2</sup>.

**Tabel 3.7** Hasil Perhitungan Aktual Pembebanan Kompresi dan Pembebanan Tarik

No	Pembebanan Maksimum	Nilai	Analisa
1	Pembebanan Kompresi	344 kN	Perlambatan 1.3 m/s
2	Pembebanan Tarikan	320 kN	Percepatan 1 m/s

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan didapatkan nilai pembebanan kompresi maksimum sebesar 344 kN yang didapatkan dari hasil perhitungan dinamika dengan kondisi terjadi perlambatan sebesar 1.3 m/s<sup>2</sup>, dan didapatkan nilai pembebanan tarik maksimum sebesar 320 kN yang didapatkan dari hasil perhitungan dinamika dengan kondisi terjadi percepatan sebesar 1 m/s<sup>2</sup>. Jika dibandingkan dengan nilai pembebanan tarik dan pembebanan kompresi berdasarkan Standarisasi EN 12663-1:2010 yang memiliki nilai pembebanan tarik sebesar 300kN dan pembebanan kompresi sebesar 400kN ternyata untuk pembebanan tarik 300kN standarisasi EN pada kategori P-IV tidak mewakili pembebanan tarik kondisi aktual, sehingga untuk mendapatkan hasil yang dapat dikategorikan aman pada penelitian ini melakukan perhitungan metode elemen hingga dengan pembebanan kompresi dan tarikan berdasarkan standarisasi dan berdasarkan perhitungan dinamika secara manual.



**Gambar 3.28** Pemberian kondisi batas dan pembebanan pada ANSYS Workbench 18.0; (a) Pembebanan pada model, (b) Kondisi Batas pada balok penyangga.

Nilai pembebanan yang telah didapatkan diberikan pada model *trailer carbody* sesuai dengan Gambar 3.17. Pembebanan vertikal yang didapatkan dari pembebanan penumpang dan pembebanan *carbody* didistribusikan pada permukaan atas *underframe*, pembebanan kompresi dan tarikan didistribusikan pada *housing coupler*, pembebanan komponen AC didistribusikan pada bagian *roof*, pembebanan komponen ACM & Battery Charger didistribusikan pada permukaan bawah *underframe* dan pembebanan vertikal komponen *coupler* didistribusikan pada *housing coupler*. Pada Gambar 3.28 merupakan gambar yang menunjukkan kondisi batas dan pembebanan yang diberikan pada *software Ansys Workbench 18.0*. Untuk melihat pembebanan secara detail dapat dilihat pada lampiran 6. Pada penelitian kasus pembebanan statik yang dilakukan terbagi menjadi 4 variasi, seperti terlihat pada tabel 3.8.

**Tabel 3.8** Variasi kasus pembebanan statik

Kasus beban	Vertikal		Kompresi & Tarik
	Tanpa penumpang	Penuh penumpang	
I	V	–	–
II	–	V	–
III	V	–	V
IV	–	V	V

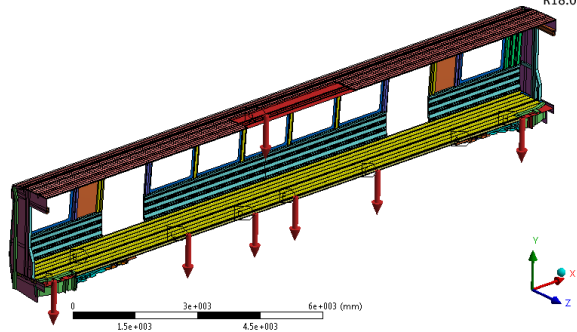
Keterangan : V = Ada

X = Tidak ada

Pembebanan yang didistribusikan pada kasus pembebanan I adalah pembebanan vertikal tanpa penumpang dan pembebanan komponen, tanpa adanya pembebanan kompresi & pembebanan tarik. Kasus pembebanan I merupakan kasus dengan kondisi pembebanan yang ringan dibandingkan dengan kasus pembebanan yang lainnya.

A: Analisa Statik Struktural  
Static Structural  
Time: 1 s

- [A] Fixed Support
- [B] Fixed Support 2
- [C] Pembebanan Vertikal:  $2.418\text{e}+005$  N
- [D] Pembebanan ACM: 11000 N
- [E] Pembebanan ACM: 11000 N
- [F] Pembebanan Battery: 2000. N
- [G] Pembebanan AC: 8700. N
- [H] Pembebanan Vertikal Coupler 1: 1810. N
- [I] Pembebanan Vertikal Coupler 2: 1810. N

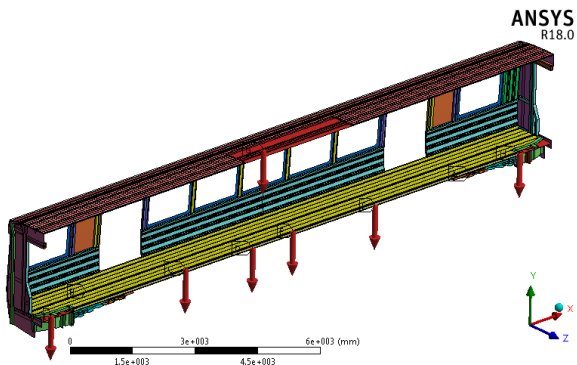


**Gambar 3.29** *Boundary Condition* Kasus Pembebanan I

Pembebanan yang didistribusikan pada kasus pembebanan II adalah pembebanan vertikal dengan kondisi penumpang penuh dan pembebanan komponen, tanpa adanya pembebanan kompresi & pembebanan tarik. Kasus pembebanan II merupakan kasus dengan kondisi pembebanan yang lebih besar dibandingkan dengan kasus pembebanan I.

A: Analisa Statik Struktural  
Static Structural  
Time: 1 s

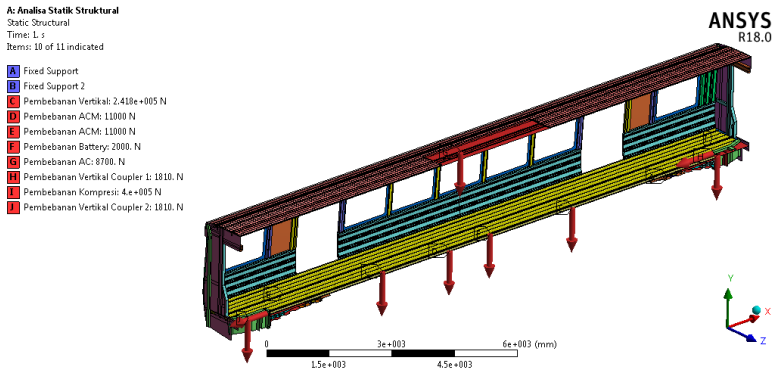
- [A] Fixed Support
- [B] Fixed Support 2
- [C] Pembebanan Vertikal:  $4.1057\text{e}+005$  N
- [D] Pembebanan ACM: 11000 N
- [E] Pembebanan ACM: 11000 N
- [F] Pembebanan Battery: 2000. N
- [G] Pembebanan AC: 8700. N
- [H] Pembebanan Vertikal Coupler 1: 1810. N
- [I] Pembebanan Vertikal Coupler 2: 1810. N



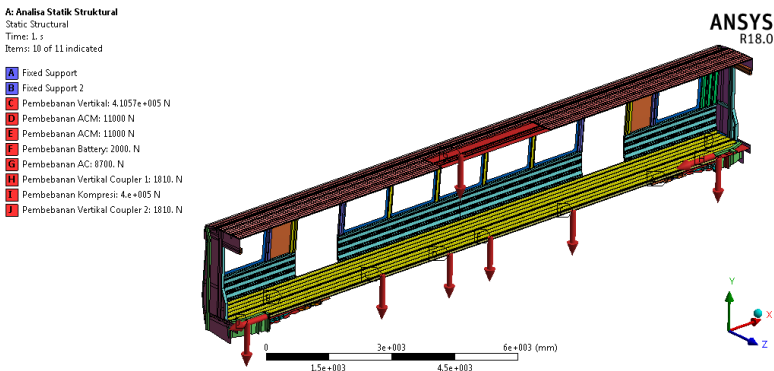
**Gambar 3.30** *Boundary Condition* Kasus Pembebanan II

Pembebanan yang didistribusikan pada kasus pembebanan III adalah pembebanan vertikal tanpa penumpang, pembebanan komponen, dan pembebanan kompresi & pembebanan tarik.

Kasus pembebanan III merupakan kasus dengan kondisi pembebanan yang lebih besar dibandingkan dengan kasus pembebanan I.



**Gambar 3.31** *Boundary Condition* Kasus Pembebanan III



**Gambar 3.32** *Boundary Condition* Kasus Pembebanan IV

Pembebanan yang didistribusikan pada kasus pembebanan IV adalah pembebanan vertikal dengan kondisi penumpang penuh, pembebanan komponen, dan pembebanan kompresi & pembebanan tarik. Kasus pembebanan IV merupakan kasus dengan kondisi pembebanan yang paling besar dibandingkan dengan kasus pembebanan lainnya.

### 3.5 Tipe Analisis dan Kontrol Solusi

Pada penelitian ini, *solution control* yang digunakan adalah *total deformation* dan *equivalent stress Von Mises*. Pada *total deformation* akan menghasilkan data deformasi total yang terjadi pada *carbody* secara menyeluruh.

#### 3.5.1 Analisis Deformasi Total

Pada penelitian ini, analisis deformasi total dilakukan untuk melihat hasil defleksi yang terjadi. Deformasi total yang dihasilkan pada penelitian ini berjumlah 4 sesuai dengan kasus beban pada tabel 3.8. Hasil defleksi pada analisis ini akan dibandingkan dengan laporan perancangan kereta LRT yang dilakukan oleh *Central Corridor Light Rail Transit*. Pada laporan ini dijelaskan bahwa, defleksi secara vertikal yang terjadi pada underframe tidak melebihi angka 0.375 *inchi* atau 9.525 mm.

#### 3.5.2 Analisis Tegangan Von-Mises

Analisis tegangan *Von-Mises* merupakan suatu teori kegagalan dalam memprediksi keamanan dari suatu material yang digunakan dalam konstruksi. Pada penelitian ini, analisis tegangan *Von-Mises* digunakan untuk mengetahui keamanan dari material yang digunakan pada komponen-komponen *carbody*. Hasil dari simulasi ini pada akhirnya akan dibandingkan dengan standarisasi EN 12663-1: 2010 dan PM 175 Tahun 2015 untuk mengetahui tegangan maksimum yang terjadi dapat memasuki toleransi atau tidak.

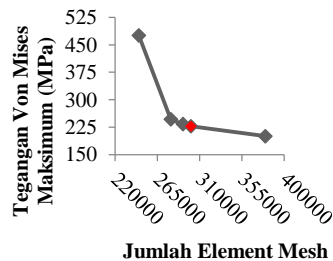
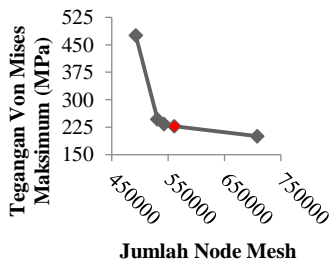
#### 3.5.3 Analisis Penentuan Faktor Koreksi Tegangan Konsentrasi

Analisis ini dilakukan dikarenakan adanya penyederhanaan model dengan menghilangkan *fillet*. Model yang dibandingkan pada analisis ini adalah antara model pada gambar 3.4.a dengan 3.4.b. Nilai tegangan *Von Mises* maksimum dibandingkan pada kedua model tersebut. Untuk mendapatkan data tegangan *Von Mises* maksimum yang sesuai dengan model,

dilakukan *mesh convergent test*. Pada analisis ini digunakan 2 tipe pembebanan, yaitu pembebanan vertikal dan pembebanan kompresi. Sehingga akan didapatkan 2 faktor pengali tegangan, yaitu faktor pengali tegangan dari hasil pembebanan vertikal dan faktor pengali tegangan dari hasil pembebanan kompresi.

**Tabel 3.9** Hasil Tegangan *Von-Mises* dengan Beban Vertikal (Model dengan *fillet*)

No	Jumlah <i>Mesh</i>		Tegangan Von Mises Maksimum
	<i>Node</i>	<i>Element</i>	
1	492558	245213	475.68
2	530952	279347	246.12
3	542764	292465	233.1
4	560838	300705	227.59
5	708008	380213	200.3

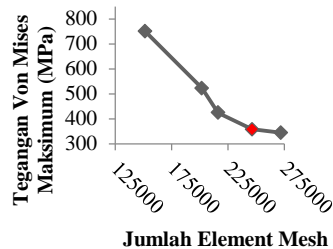
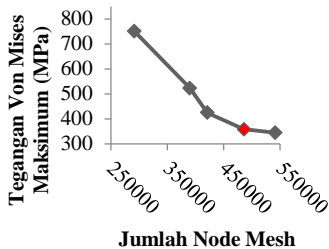


**Gambar 3.33** Grafik *Mesh Convergent Test* Model dengan *fillet* (Pembebanan Vertikal)

Dari data pada tabel 3.9 didapatkan grafik pada gambar 3.33. Hasil simulasi dapat dilihat pada [lampiran 7.1](#). Pada hasil simulasi ini, didapatkan titik optimal pada meshing yang berjumlah 560838 *node* dan 300705 *element* dengan hasil tegangan *von mises* maksimum bernilai 227.59 MPa.

**Tabel 3.10** Hasil Tegangan *Von-Mises* dengan Beban Vertikal  
(Model tanpa *fillet*)

No	Jumlah Mesh		Tegangan Von Mises Maksimum
	<i>Node</i>	<i>Element</i>	
1	291633	151377	750.91
2	390203	201829	522.54
3	420998	216238	424.54
4	486007	246316	358.64
5	541728	272039	344.54



**Gambar 3.34** Grafik *Mesh Convergent Test* Model tanpa *fillet*  
(Pembebanan Vertikal)

Dari data pada tabel 3.10 didapatkan grafik pada gambar 3.34. Hasil simulasi dapat dilihat pada lampiran 8.1. Pada hasil simulasi ini, didapatkan titik optimal pada meshing yang berjumlah 486007 *node* dan 246316 *element* dengan hasil tegangan *von mises* maksimum bernilai 358.64 MPa.

Sehingga dari dua data tersebut, didapatkan faktor pengali tegangan pada pembebanan vertikal.

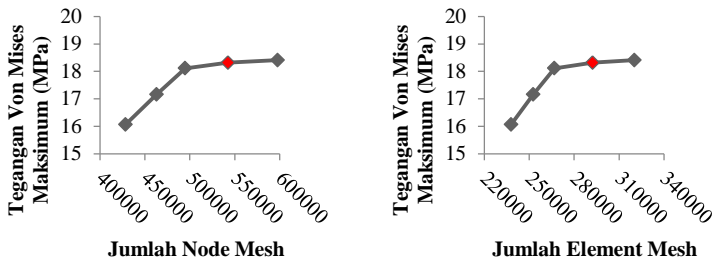
$$K_t = \frac{\sigma_{\text{tanpa fillet}}}{\sigma_{\text{dengan fillet}}}$$



$$K_{t1} = \frac{358.64}{227.59} = 1.5758$$

**Tabel 3.11** Hasil Tegangan *Von-Mises* dengan Beban Kompresi  
(Model dengan *fillet*)

No	Jumlah <i>Mesh</i>		Tegangan Von Mises Maksimum
	<i>Node</i>	<i>Element</i>	
1	428203	237845	16.064
2	463100	252669	17.161
3	494752	266803	18.111
4	542370	292270	18.322
5	597886	320300	18.408

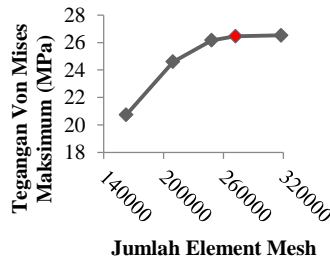
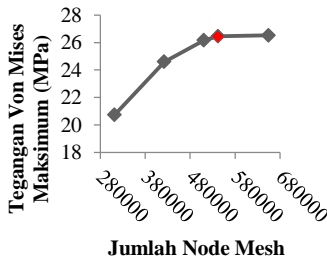


**Gambar 3.35** Grafik *Mesh Convergent Test* Model dengan *fillet*  
(Pembebanan Kompresi)

Dari data pada tabel 3.11 didapatkan grafik pada gambar 3.35. Hasil simulasi dapat dilihat pada [lampiran 7.2](#). Pada hasil simulasi ini, didapatkan titik optimal pada meshing yang berjumlah 542370 *node* dan 292270 *element* dengan hasil tegangan *von mises* maksimum bernilai 18.322 MPa.

**Tabel 3.12** Hasil Tegangan *Von-Mises* dengan Beban Kompresi  
(Model tanpa *fillet*)

No	Jumlah Mesh		Tegangan Von Mises Maksimum
	<i>Node</i>	<i>Element</i>	
1	311893	162705	20.737
2	422550	209603	24.592
3	510407	248194	26.153
4	541728	272039	26.465
5	654739	317835	26.522



**Gambar 3.36** Grafik *Mesh Convergent Test* Model tanpa *fillet*  
(Pembebanan Kompresi)

Dari data pada tabel 3.12 didapatkan grafik pada gambar 3.36. Hasil simulasi dapat dilihat pada [lampiran 8.2](#). Pada hasil simulasi ini, didapatkan titik optimal pada meshing yang berjumlah 541728 *node* dan 272039 *element* dengan hasil tegangan *von mises* maksimum bernilai 26.465 MPa.

Sehingga dari dua data tersebut, didapatkan faktor pengali tegangan pada pembebanan vertikal.

$$K_t = \frac{\sigma_{\text{tanpa fillet}}}{\sigma_{\text{dengan fillet}}}$$

$$K_{t2} = \frac{26.465}{18.322} = 1.444$$

Didapatkan dua data faktor pengali, yaitu faktor pengali dari pembebanan vertikal dan faktor pengali dari pembebanan kompresi. Dari kedua data ini diambil nilai terbesar untuk dijadikan faktor pengali yang akan digunakan pada analisis selanjutnya.

$$K_t = \text{Min} \begin{cases} K_{t1} \\ K_{t2} \end{cases}, \quad K_{t2} < K_{t1}$$

$$K_t = K_{t2} = 1.444 \approx 1.4 \text{ (dibulatkan kebawah)}$$

### 3.5.4 Tahap Verifikasi

Tahap verifikasi sangat penting dalam melakukan proses perhitungan dengan metode elemen hingga, dikarenakan tahap ini merupakan tahap yang menentukan dapat diterimanya hasil perhitungan dengan metode elemen hingga seorang peneliti. Dengan tahap verifikasi memudahkan setiap peneliti untuk melakukan perhitungan elemen hingga dengan model yang serupa. Pada penelitian ini dilakukan prosedur verifikasi dengan mengikuti jurnal *thesis* “*Modeling and Structural Analysis of Railway Vehicle Body with Finite Element Method*” oleh Belete Jirru. Pada tahap verifikasi ini, model *carbody* kereta yang dianalisa oleh Belete Jirru digambar ulang dengan data model sesuai dengan tabel 3.13. Perbandingan 3D model *carbody* dapat dilihat pada lampiran 9.

**Tabel 3.13** Data dimensi model *carbody* kereta (Belete Jirru)

<b>Dimensi <i>Carbody</i> Kereta</b>	
Panjang (mm)	22535
Lebar (mm)	2180
Tinggi (mm)	2796

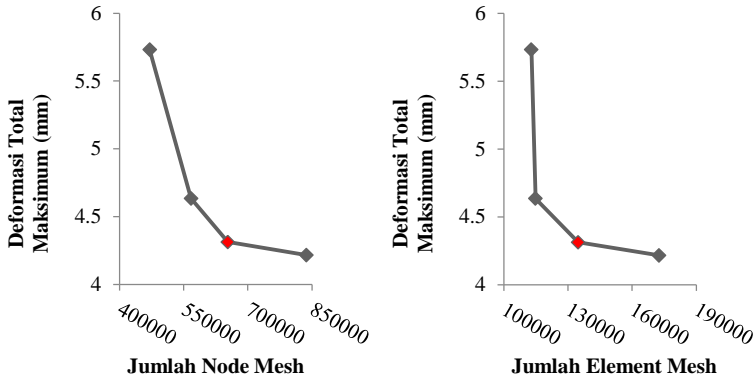
Kondisi batas dan pembebanan pada tahap verifikasi ini sesuai dengan *thesis* Belete Jirru. Kondisi batas dan pembebanan

dapat dilihat pada lampiran 10. Diberikan tumpuan *fixed* pada bagian rangka yang berfungsi sebagai penumpu bogie. Namun dalam *thesis* ini tidak diperlihatkan dengan jelas letak tumpuan *fixed*. Sehingga tumpuan *fixed* diasumsikan pada rangka sesuai pada lampiran 10. Dalam tahap verifikasi ini, data yang diverifikasi adalah data deformasi total dan data tegangan prinsipal maksimum. Dari hasil perhitungan dengan metode elemen hingga pada model *carbody* kereta Belete Jirru didapatkan nilai tegangan prinsipal maksimum sebesar 126.95 MPa dan deformasi total sebesar 4.3125 mm (dapat dilihat pada lampiran 13.2). Hasil tersebut didapatkan dengan melakukan metode *mesh convergent test* dengan jumlah *node mesh* sebanyak 652979 dan jumlah *element mesh* sebanyak 134693. Data *mesh convergent test* dapat dilihat pada lampiran 11.

**Tabel 3.14** Data *Mesh Convergent Test*

No	Jumlah <i>Mesh</i>		Deformasi Total Maksimum
	<i>Node</i>	<i>Element</i>	
1	470780	112839	5.7304
2	567223	114781	4.6336
3	652979	134693	4.3125
4	836826	172588	4.2158

Dari data tabel 3.14 didapatkan grafik seperti pada gambar 3.26. Grafik tersebut menunjukkan bahwa hasil deformasi total data ke-3 hingga data ke-4 menghasilkan nilai deformasi total maksimum yang tidak jauh berbeda dan dapat dikatakan stabil atau menunjukan hasil yang konsisten dengan bertambahnya jumlah *node mesh* dan *element mesh*. Sehingga hasil data ke-3 dapat dijadikan hasil dari perhitungan metode elemen hingga dengan jumlah *node* dan *element* mesh yang optimal. Hasil *meshing* dapat dilihat pada lampiran 12.



**Gambar 3.37** (a) Grafik jumlah *node mesh* terhadap nilai deformasi total maksimum, (b) Grafik jumlah *element mesh* terhadap nilai deformasi total maksimum

Hasil ini diverifikasi dengan hasil perhitungan yang telah dilakukan oleh Belete Jirru. Pada perhitungan metode elemen hingga yang telah dilakukan oleh Belete Jirru, didapatkan nilai tegangan prinsipal maksimum sebesar 124.57 MPa dan deformasi total sebesar 4.2897 mm (dapat dilihat pada [lampiran 13.1](#)). Terdapat perbedaan hasil perhitungan dengan metode elemen hingga yang dilakukan penulis dengan hasil yang dilakukan oleh Belete Jirru. Perbedaan ini dikarenakan 3D model yang dianalisa tidak sepenuhnya sama, dan kondisi batas tumpuan *fixed* tidak berada di letak yang sepenuhnya sama. Hal ini terjadi karena data yang ditampilkan oleh Belete Jirru mengenai dimensi model *carbody* kurang lengkap dan detail letak kondisi batas tumpuan *fixed* kurang terlihat. Namun hasil yang didapatkan penulis tidak berbeda jauh dengan hasil yang telah dilakukan oleh Belete Jirru.

$$\% \text{ error tegangan prinsipal maks} = \frac{126.95 - 124.57}{124.57} \times 100\% = 1.91\%$$

$$\% \text{ error deformasi total maks} = \frac{4.3125 - 4.2897}{4.2897} \times 100\% = 0.53\%$$

Dari hasil yang telah didapatkan, proses perhitungan metode elemen hingga yang telah dilakukan terdapat faktor error sebesar 1.91% untuk hasil tegangan prinsipal maksimum dan 0.53 % untuk hasil deformasi total maksimum. Dengan nilai error yang dapat diasumsikan kecil ini, maka proses perhitungan metode elemen hingga yang telah dilakukan dapat dikatakan terverifikasi.

## **BAB IV**

### **HASIL DAN ANALISIS**

Dalam bab 4 ini akan dijelaskan mengenai hasil dari simulasi desain kontruksi *carbody* kereta LRT Palembang yang terdiri dari komponen utama *underframe*, *end wall*, *side wall*, dan *roof* yang menggunakan material Al 6061-T6 pada analisa 1 dan Al 6005A-T6 pada analisa 2, dan komponen *main support beam* yang menggunakan material SPA-H JIS G 3125.

#### **4.1 Hasil Analisis Tegangan Von-Mises Maksimum**

Untuk menguji apakah deformasi yang dihasilkan pada proses perhitungan dengan metode elemen hingga dapat digunakan untuk menganalisis struktur statis kontruksi *carbody* kereta LRT, maka dilakukan perhitungan dengan metode elemen hingga untuk mendapatkan nilai tegangan von mises maksimum terlebih dahulu. Perhitungan ini bertujuan untuk memastikan tegangan yang terjadi pada kontruksi *carbody* kereta LRT sudah sesuai dengan standarisasi PM 175 Tahun 2015.

##### **4.1.1 Material Al 6061-T6**

Sesuai dengan standarisasi PM 175 tahun 2015 tentang perancangan kontruksi *carbody* dapat diterima ketika tegangan yang terjadi pada beban maksimum pada titik kritis kontruksi badan kereta tidak melebihi 75% tegangan mulur bahan. Material Al 6061-T6 memiliki nilai tegangan mulur sebesar 275 MPa sesuai dengan tabel 3.1.

##### **• Kasus Pembebanan I**

Pada kasus pembebanan I tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material Al 6061-T6 terjadi pada komponen *Side Wall* tepatnya pada tepi jendela dengan nilai 18.907 MPa.

Tegangan Maksimum hasil simulasi = 18.907 MPa

Faktor koreksi tegangan = 1.4

$$\begin{aligned}\text{Tegangan Maksimum yang terjadi} &= \frac{18.907}{1.4} \\ &= 13.51 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Dengan nilai faktor koreksi tegangan sebesar 1.4, maka nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tepi jendela sebesar 13.51 MPa.

$$\text{Persentase tegangan} = \frac{13.51}{275} \times 100\% = 4.91\% \text{ dari tegangan mulur}$$

Maka pada kasus pembebanan I didapatkan nilai 4.91% dari tegangan mulur bahan Al 6061-T6, sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur Al 6061-T6.

#### • Kasus Pembebanan II

Pada kasus pembebanan II tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material Al 6061-T6 terjadi pada komponen *Side Wall* tepatnya pada tepi jendela dengan nilai 23.507 MPa.

$$\text{Tegangan Maksimum hasil simulasi} = 23.507 \text{ MPa}$$

$$\text{Faktor koreksi tegangan} = 1.4$$

$$\begin{aligned}\text{Tegangan Maksimum yang terjadi} &= \frac{23.507}{1.4} \\ &= 16.79 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Dengan nilai faktor koreksi tegangan sebesar 1.4, maka nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tepi jendela sebesar 16.79 MPa.

$$\text{Persentase tegangan} = \frac{16.79}{275} \times 100\% = 6.11\% \text{ dari tegangan mulur}$$

Maka pada kasus pembebanan II didapatkan nilai 6.11 % dari tegangan mulur bahan Al 6061-T6, sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur Al 6061-T6.



- **Kasus Pembebanan III**

- **Pembebanan Kompresi dan Tarikan sesuai dengan Standarisasi**

Pada kasus pembebanan III tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material Al 6061-T6 terjadi pada komponen *End Wall* dengan nilai 29.974 MPa.

$$\text{Tegangan Maksimum hasil simulasi} = 29.974 \text{ MPa}$$

$$\text{Faktor koreksi tegangan} = 1.4$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan Maksimum yang terjadi} &= \frac{29.974}{1.4} \\ &= 21.41 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Dengan nilai faktor koreksi tegangan sebesar 1.4, maka nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tepi jendela sebesar 21.41 MPa.

$$\text{Persentase tegangan} = \frac{21.41}{275} \times 100\% = 7.79\% \text{ dari tegangan mulur}$$

Maka pada kasus pembebanan III didapatkan nilai 7.79 % dari tegangan mulur bahan Al 6061-T6, sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur Al 6061-T6.

- **Pembebanan Kompresi dan Tarikan sesuai dengan Perhitungan Aktual**

Pada kasus pembebanan III tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material Al 6061-T6 terjadi pada komponen *End Wall* dengan nilai 26.912 MPa.

$$\text{Tegangan Maksimum hasil simulasi} = 26.912 \text{ MPa}$$

$$\text{Faktor koreksi tegangan} = 1.4$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan Maksimum yang terjadi} &= \frac{26.912}{1.4} \\ &= 19.22 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Dengan nilai faktor koreksi tegangan sebesar 1.4, maka nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tepi jendela sebesar 19.22 MPa.

$$\text{Persentase tegangan} = \frac{19.22}{275} \times 100\% = 6.99\% \text{ dari tegangan mulur}$$

Maka pada kasus pembebanan III didapatkan nilai 6.99 % dari tegangan mulur bahan Al 6061-T6, sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur Al 6061-T6.

#### • Kasus Pembebanan IV

##### ➤ Pembebanan Kompresi dan Tarikan sesuai dengan Standarisasi

Pada kasus pembebanan IV tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material Al 6061-T6 terjadi pada komponen *Side Wall* tepatnya pada tepi jendela dengan nilai 33.056 MPa.

$$\text{Tegangan Maksimum hasil simulasi} = 33.056 \text{ MPa}$$

$$\text{Faktor koreksi tegangan} = 1.4$$

$$\text{Tegangan Maksimum yang terjadi} = \frac{33.056}{1.4}$$

$$= 23.61 \text{ MPa}$$

Dengan nilai faktor koreksi tegangan sebesar 1.4, maka nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tepi jendela sebesar 23.61 MPa.

$$\text{Persentase tegangan} = \frac{23.61}{275} \times 100\% = 8.59\% \text{ dari tegangan mulur}$$

Maka pada kasus pembebanan IV didapatkan nilai 8.59 % dari tegangan mulur bahan Al 6061-T6, sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur Al 6061-T6.

➤ **Pembebanan Kompresi dan Tarikan sesuai dengan Perhitungan Aktual**

Pada kasus pembebanan IV tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material Al 6061-T6 terjadi pada komponen *Side Wall* tepatnya pada tepi jendela dengan nilai 32.538 MPa.

$$\text{Tegangan Maksimum hasil simulasi} = 32.528 \text{ MPa}$$

$$\text{Faktor koreksi tegangan} = 1.4$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan Maksimum yang terjadi} &= \frac{32.538}{1.4} \\ &= 23.24 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Dengan nilai faktor koreksi tegangan sebesar 1.4, maka nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tepi jendela sebesar 23.24 MPa.

$$\text{Persentase tegangan} = \frac{23.24}{275} \times 100\% = 8.45\% \text{ dari tegangan mulur}$$

Maka pada kasus pembebanan IV didapatkan nilai 8.45 % dari tegangan mulur bahan Al 6061-T6, sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur Al 6061-T6.

**Tabel 4.1** Hasil Tegangan Maksimum Von Mises pada Material Al 6061-T6

Kasus	Tegangan Yield (MPa)	Tegangan Maksimum Von Mises (MPa)		% dari Tegangan Yield	Faktor Keamanan	Analisa Tegangan Von Mises
		Hasil Metode Elemen Hingga	Hasil Koreksi			
I	275	18.907	13.51	4.91%	20.36	Aman
II	275	23.507	16.79	6.11%	16.38	Aman
III	275	29.974	21.41	7.79%	12.84	Aman
		26.912	19.22	6.99%	14.31	Aman
IV	275	33.056	23.61	8.59%	11.65	Aman
		32.538	23.24	8.45%	11.83	Aman

Hasil perhitungan dengan metode elemen hingga dapat dilihat pada lampiran 14. Hasil tegangan maksimum von mises yang terjadi pada komponen *carbbody* dengan material Al 6061-T6 disimpulkan pada Tabel 4.1.

#### 4.1.2 Material Al 6005A-T6

Dikarenakan material Al 6061-T6 yang merupakan material untuk kontruksi pesawat terbang ini terlalu kaku jika digunakan sebagai material kontruksi *carbbody* kereta LRT, maka pada penelitian dilakukan analisis lanjutan untuk material Al 6005A-T6 yang akan diaplikasikan pada kontruksi *carbbody* kereta LRT. Berikut adalah hasil perhitungan dengan metode elemen hingga pada kontruksi *carbbody* kereta LRT ketika material Al 6061-T6 digantikan dengan material Al 6005A-T6. Sesuai dengan standariasi PM 175 tahun 2015 tentang perancangan kontruksi *carbbody* dapat diterima ketika tegangan yang terjadi pada beban maksimum pada titik kritis kontruksi badan kereta tidak melebihi 75% tegangan mulur bahan. Material Al 6005A-T6 memiliki nilai tegangan mulur sebesar 230 MPa sesuai dengan tabel 3.2.

##### • Kasus Pembebanan I

Pada kasus pembebanan I tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material Al 6005A-T6 terjadi pada komponen *Side Wall* tepatnya pada tepi jendela dengan nilai 21.084 MPa.

$$\text{Tegangan Maksimum hasil simulasi} = 21.084 \text{ MPa}$$

$$\text{Faktor koreksi tegangan} = 1.4$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan Maksimum yang terjadi} &= \frac{21.084}{1.4} \\ &= 15.06 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Dengan nilai faktor koreksi tegangan sebesar 1.4, maka nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tepi jendela sebesar 15.06 MPa.

$$\text{Persentase tegangan} = \frac{15.06}{230} \times 100\% = 6.55\% \text{ dari tegangan mulur}$$

Maka pada kasus pembebanan I didapatkan nilai 6.55 % dari tegangan mulur bahan Al 6005A-T6, sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur Al 6005A-T6.

#### • Kasus Pembebanan II

Pada kasus pembebanan II tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material Al 6005A-T6 terjadi pada komponen *Side Wall* tepatnya pada tepi jendela dengan nilai 32.228 MPa.

$$\text{Tegangan Maksimum hasil simulasi} = 32.228 \text{ MPa}$$

$$\text{Faktor koreksi tegangan} = 1.4$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan Maksimum yang terjadi} &= \frac{32.228}{1.4} \\ &= 23.02 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Dengan nilai faktor koreksi tegangan sebesar 1.4, maka nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tepi jendela sebesar 23.02 MPa.

$$\text{Persentase tegangan} = \frac{23.02}{230} \times 100\% = 10.01\% \text{ dari tegangan mulur}$$

Maka pada kasus pembebanan II didapatkan nilai 10.01 % dari tegangan mulur bahan Al 6005A-T6, sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur Al 6005A-T6.

#### • Kasus Pembebanan III

##### ➤ Pembebanan Kompresi dan Tarikan sesuai dengan Standarisasi

Pada kasus pembebanan III tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material Al 6005A-T6 terjadi pada komponen *End Wall* dengan nilai 35.244 MPa.

$$\begin{aligned}
 \text{Tegangan Maksimum hasil simulasi} &= 35.244 \text{ MPa} \\
 \text{Faktor koreksi tegangan} &= 1.4 \\
 \text{Tegangan Maksimum yang terjadi} &= \frac{35.244}{1.4} \\
 &= 25.17 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Dengan nilai faktor koreksi tegangan sebesar 1.4, maka nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tepi jendela sebesar 25.17 MPa.

$$\text{Persentase tegangan} = \frac{25.17}{230} \times 100\% = 10.95\% \text{ dari tegangan mulur}$$

Maka pada kasus pembebanan III didapatkan nilai 10.95 % dari tegangan mulur bahan Al 6005A-T6, sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur Al 6005A-T6.

#### ➤ **Pembebanan Kompresi dan Tarikan sesuai dengan Perhitungan Aktual**

Pada kasus pembebanan III tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material Al 6005A-T6 terjadi pada komponen *End Wall* dengan nilai 30.659 MPa.

$$\begin{aligned}
 \text{Tegangan Maksimum hasil simulasi} &= 30.659 \text{ MPa} \\
 \text{Faktor koreksi tegangan} &= 1.4 \\
 \text{Tegangan Maksimum yang terjadi} &= \frac{30.659}{1.4} \\
 &= 21.90 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Dengan nilai faktor koreksi tegangan sebesar 1.4, maka nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tepi jendela sebesar 21.90 MPa.

$$\text{Persentase tegangan} = \frac{21.90}{230} \times 100\% = 9.52\% \text{ dari tegangan mulur}$$

Maka pada kasus pembebanan III didapatkan nilai 9.52 % dari tegangan mulur bahan Al 6005A-T6, sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur Al 6005A-T6.

- **Kasus Pembebanan IV**

- **Pembebanan Kompresi dan Tarikan sesuai dengan Standarisasi**

Pada kasus pembebanan IV tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material Al 6005A-T6 terjadi pada komponen *Side Wall* tepatnya pada tepi jendela dengan nilai 39.298 MPa.

$$\text{Tegangan Maksimum hasil simulasi} = 39.298 \text{ MPa}$$

$$\text{Faktor koreksi tegangan} = 1.4$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan Maksimum yang terjadi} &= \frac{39.298}{1.4} \\ &= 28.07 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Dengan nilai faktor koreksi tegangan sebesar 1.4, maka nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tepi jendela sebesar 28.07 MPa.

$$\text{Persentase tegangan} = \frac{28.07}{230} \times 100\% = 12.20\% \text{ dari tegangan mulur}$$

Maka pada kasus pembebanan IV didapatkan nilai 12.20 % dari tegangan mulur bahan Al 6005A-T6, sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur Al 6005A-T6.

- **Pembebanan Kompresi dan Tarikan sesuai dengan Perhitungan Aktual**

Pada kasus pembebanan IV tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material Al 6005A-T6 terjadi pada komponen *Side Wall* tepatnya pada tepi jendela dengan nilai 38.995 MPa.

$$\text{Tegangan Maksimum hasil simulasi} = 38.995 \text{ MPa}$$

Faktor koreksi tegangan

= 1.4

Tegangan Maksimum yang terjadi

$$= \frac{38.995}{1.4}$$

= 27.85 MPa

Dengan nilai faktor koreksi tegangan sebesar 1.4, maka nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tepi jendela sebesar 27.85 MPa.

Persentase tegangan

$$= \frac{27.85}{230} \times 100\% = 12.11\%$$

dari tegangan mulur

Maka pada kasus pembebanan IV didapatkan nilai 12.11 % dari tegangan mulur bahan Al 6005A-T6, sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur Al 6005A-T6.

Hasil perhitungan dengan metode elemen hingga dapat dilihat pada lampiran 15. Hasil tegangan maksimum von mises yang terjadi pada komponen *carbody* dengan material Al 6005A-T6 disimpulkan pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2** Hasil Tegangan Maksimum Von Mises pada Material Al 6005A-T6

Kasus	Tegangan Yield (MPa)	Tegangan Maksimum Von Mises (MPa)		% dari Tegangan Yield	Faktor Keamanan	Analisa Tegangan Von Mises
		Hasil Metode Elemen Hingga	Hasil Koreksi			
I	230	21.084	15.06	6.55%	15.27	Aman
II	230	32.228	23.02	10.01%	9.99	Aman
III	230	35.244	25.17	10.95%	9.14	Aman
		30.659	21.90	9.52%	10.50	Aman
IV	230	39.298	28.07	12.20 %	8.19	Aman
		38.995	27.85	12.11%	8.26	Aman



#### 4.1.3 Material SPA-H (JIS G 3125)

Pada semua kasus pembebanan, tegangan von mises maksimum terjadi pada komponen balok penyangga utama (*main support beam*) yang menggunakan material SPA-H (JIS G 3125).

Sesuai dengan standarisasi PM 175 tahun 2015 tentang perancangan konstruksi *carbody* dapat diterima ketika tegangan yang terjadi pada beban maksimum pada titik kritis konstruksi badan kereta tidak melebihi 75% tegangan mulur bahan. Material SPA-H (JIS G 3125) memiliki nilai tegangan mulur sebesar 355 MPa sesuai dengan tabel 3.3.

##### • Kasus Pembebanan I

Pada kasus pembebanan I tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material SPA-H (JIS G 3125) terjadi pada komponen *Main Support Beam* tepatnya pada tepi penyangga dengan nilai 95.946 MPa.

$$\text{Tegangan Maksimum hasil simulasi} = 95.946 \text{ MPa}$$

$$\text{Faktor koreksi tegangan} = 1.4$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan Maksimum yang terjadi} &= \frac{95.946}{1.4} \\ &= 68.53 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Dengan nilai faktor koreksi tegangan sebesar 1.4, maka nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tepi jendela sebesar 68.53 MPa.

$$\text{Persentase tegangan} = \frac{68.53}{355} \times 100\% = 19.31\% \text{ dari tegangan mulur}$$

Maka pada kasus pembebanan I didapatkan nilai 19.31 % dari tegangan mulur bahan SPA-H (JIS G 3125), sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur SPA-H (JIS G 3125).

### • Kasus Pembebanan II

Pada kasus pembebanan II tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material SPA-H (JIS G 3125) terjadi pada komponen *Main Support Beam* tepatnya pada tepi penyangga dengan nilai 120.54 MPa.

$$\text{Tegangan Maksimum hasil simulasi} = 120.54 \text{ MPa}$$

$$\text{Faktor koreksi tegangan} = 1.4$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan Maksimum yang terjadi} &= \frac{120.54}{1.4} \\ &= 86.10 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Dengan nilai faktor koreksi tegangan sebesar 1.4, maka nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tepi jendela sebesar 86.10 MPa.

$$\text{Persentase tegangan} = \frac{86.10}{355} \times 100\% = 24.25\% \text{ dari tegangan mulur}$$

Maka pada kasus pembebanan II didapatkan nilai 24.25 % dari tegangan mulur bahan SPA-H (JIS G 3125), sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur SPA-H (JIS G 3125).

### • Kasus Pembebanan III

#### ➤ Pembebanan Kompresi dan Tarikan sesuai dengan Standarisasi

Pada kasus pembebanan III tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material SPA-H (JIS G 3125) terjadi pada komponen *Main Support Beam* tepatnya pada tepi penyangga dengan nilai 149.74 MPa.

$$\text{Tegangan Maksimum hasil simulasi} = 149.74 \text{ MPa}$$

$$\text{Faktor koreksi tegangan} = 1.4$$

$$\text{Tegangan Maksimum yang terjadi} = \frac{149.74}{1.4}$$

$$= 106.96 \text{ MPa}$$

Dengan nilai faktor koreksi tegangan sebesar 1.4, maka nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tepi jendela sebesar 106.96 MPa.

$$\text{Persentase tegangan} = \frac{106.96}{355} \times 100\% = 30.13\% \text{ dari tegangan mulur}$$

Maka pada kasus pembebanan III didapatkan nilai 30.13 % dari tegangan mulur bahan SPA-H (JIS G 3125), sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur SPA-H (JIS G 3125).

#### ➤ **Pembebanan Kompresi dan Tarikan sesuai dengan Perhitungan Aktual**

Pada kasus pembebanan III tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material SPA-H (JIS G 3125) terjadi pada komponen *Main Support Beam* tepatnya pada tepi penyangga dengan nilai 126.86 MPa.

$$\text{Tegangan Maksimum hasil simulasi} = 126.86 \text{ MPa}$$

$$\text{Faktor koreksi tegangan} = 1.4$$

$$\text{Tegangan Maksimum yang terjadi} = \frac{126.86}{1.4}$$

$$= 90.61 \text{ MPa}$$

Dengan nilai faktor koreksi tegangan sebesar 1.4, maka nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tepi jendela sebesar 90.61 MPa.

$$\text{Persentase tegangan} = \frac{90.61}{355} \times 100\% = 25.53\% \text{ dari tegangan mulur}$$

Maka pada kasus pembebanan III didapatkan nilai 25.53 % dari tegangan mulur bahan SPA-H (JIS G 3125), sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur SPA-H (JIS G 3125).

• **Kasus Pembebanan IV**

➤ **Pembebanan Kompresi dan Tarikan sesuai dengan Standarisasi**

Pada kasus pembebanan IV tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material SPA-H (JIS G 3125) terjadi pada komponen *Main Support Beam* tepatnya pada tepi penyangga dengan nilai 153.31 MPa.

$$\text{Tegangan Maksimum hasil simulasi} = 153.31 \text{ MPa}$$

$$\text{Faktor koreksi tegangan} = 1.4$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan Maksimum yang terjadi} &= \frac{153.31}{1.4} \\ &= 109.51 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Dengan nilai faktor koreksi tegangan sebesar 1.4, maka nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tepi jendela sebesar 109.51 MPa.

$$\text{Persentase tegangan} = \frac{109.51}{355} \times 100\% = 30.85\% \text{ dari tegangan mulur}$$

Maka pada kasus pembebanan IV didapatkan nilai 30.85 % dari tegangan mulur bahan SPA-H (JIS G 3125), sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur SPA-H (JIS G 3125).

➤ **Pembebanan Kompresi dan Tarikan sesuai dengan Perhitungan Aktual**

Pada kasus pembebanan IV tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material SPA-H (JIS G 3125) terjadi pada komponen *Main Support Beam* tepatnya pada tepi penyangga dengan nilai 129.88 MPa.

$$\text{Tegangan Maksimum hasil simulasi} = 129.88 \text{ MPa}$$

$$\text{Faktor koreksi tegangan} = 1.4$$

$$\text{Tegangan Maksimum yang terjadi} = \frac{129.88}{1.4}$$

$$= 92.77 \text{ MPa}$$

Dengan nilai faktor koreksi tegangan sebesar 1.4, maka nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tepi jendela sebesar 92.77 MPa.

$$\text{Persentase tegangan} = \frac{92.77}{355} \times 100\% = 26.13\% \text{ dari tegangan mulur}$$

Maka pada kasus pembebanan IV didapatkan nilai 26.13 % dari tegangan mulur bahan SPA-H (JIS G 3125), sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur SPA-H (JIS G 3125).

Hasil perhitungan dengan metode elemen hingga dapat dilihat pada lampiran 16. Hasil tegangan maksimum von mises yang terjadi pada komponen *carbody* dengan material SPA-H (JIS G 3125) disimpulkan pada Tabel 4.3.

**Tabel 4.3** Hasil Tegangan Maksimum Von Mises pada Material SPA-H (JIS G 3125)

Kasus	Tegangan Yield (MPa)	Tegangan Maksimum Von Mises (MPa)		% dari Tegangan Yield	Faktor Keamanan	Analisa Tegangan Von Mises
		Hasil Metode Elemen Hingga	Hasil Koreksi			
I	355	95.946	68.53	19.31%	5.18	Aman
II	355	120.54	86.10	24.25%	4.12	Aman
III	355	149.74	106.96	30.13%	3.32	Aman
		126.86	90.61	25.53%	3.92	Aman
IV	355	153.31	109.51	30.85%	3.24	Aman
		129.88	92.77	25.13%	3.83	Aman

## 4.2 Hasil Analisis Deformasi Total Maksimum

### 4.2.1 Material Al 6061-T6

Material Al 6061-T6 ini digunakan pada komponen utama *carbody* kereta LRT, yaitu *underframe*, *end wall*, *side wall*, dan *roof*. Sedangkan untuk *main support beam* menggunakan materi SPA-H JIS (G-3125). Dengan mengikuti laporan perancangan LRT yang dibuat oleh “*Central Corridor Light Rail Transit*” pada tahun 2008 yang menerangkan bahwa batasan defleksi maksimum yang terjadi pada konstruksi *carbody* kereta LRT adalah sebesar 0.375 in atau 9.525 mm, konstruksi *carbody* kereta LRT dapat dikatakan aman, jika nilai deformasi total yang terjadi lebih kecil dari nilai batasan maksimum defleksi yang diperbolehkan sesuai laporan tersebut.

#### • Kasus Pembebanan I

Pembebanan yang didistribusikan pada kasus pembebanan I adalah pembebanan vertikal tanpa penumpang, dan pembebanan komponen. Deformasi total maksimum sebesar 2.9298 mm terjadi pada komponen *underframe*.

$$\text{Nilai Faktor Keamanan Defleksi} = \frac{9.525}{2.9298}$$

$$\text{Nilai Faktor Keamanan Defleksi} = 3.25$$

Jika hasil pada kasus pembebanan I dibandingkan dengan referensi laporan perancangan LRT “*Central Corridor Light Rail Transit*” menghasilkan angka keamanan untuk defleksi yang terjadi sebesar 3.25.

#### • Kasus Pembebanan II

Pembebanan yang didistribusikan pada kasus pembebanan II adalah pembebanan vertikal dengan kondisi penumpang penuh, dan pembebanan komponen. Deformasi total maksimum sebesar 3.679 mm terjadi pada komponen *underframe*.

$$\text{Nilai Faktor Keamanan Defleksi} = \frac{9.525}{3.679}$$

Nilai Faktor Keamanan Defleksi = 2.59

Jika hasil pada kasus pembebanan II dibandingkan dengan referensi laporan perancangan LRT “*Central Corridor Light Rail Transit*” menghasilkan angka keamanan untuk defleksi yang terjadi sebesar 2.59.

• **Kasus Pembebanan III**

Pembebanan yang didistribusikan pada kasus pembebanan III adalah pembebanan vertikal tanpa penumpang, pembebanan komponen, dan pembebanan kompresi & pembebanan tarik. Deformasi total maksimum sebesar 2.948 mm terjadi pada komponen *underframe*.

$$\text{Nilai Faktor Keamanan Defleksi} = \frac{9.525}{2.948}$$

Nilai Faktor Keamanan Defleksi = 3.23

Jika hasil pada kasus pembebanan III dibandingkan dengan referensi laporan perancangan LRT “*Central Corridor Light Rail Transit*” menghasilkan angka keamanan untuk defleksi yang terjadi sebesar 3.23.

• **Kasus Pembebanan IV**

Pembebanan yang didistribusikan pada kasus pembebanan IV adalah pembebanan vertikal tanpa penumpang, pembebanan komponen, dan pembebanan kompresi & pembebanan tarik. Deformasi total maksimum sebesar 3.9546 mm terjadi pada komponen *underframe*.

$$\text{Nilai Faktor Keamanan Defleksi} = \frac{9.525}{3.9546}$$

Nilai Faktor Keamanan Defleksi = 2.41

Jika hasil pada kasus pembebanan IV dibandingkan dengan referensi laporan perancangan LRT “*Central Corridor*

*Light Rail Transit*” menghasilkan angka keamanan untuk defleksi yang terjadi sebesar 2.41.

Hasil perhitungan dengan metode elemen hingga dapat dilihat pada lampiran 17. Hasil deformasi total yang terjadi pada komponen *carbody* dengan material Al 6061-T6 disimpulkan pada Tabel 4.4.

**Tabel 4.4** Hasil Deformasi Total Maksimum pada Material Al 6061-T6

No	Kasus	Deformasi Total (mm)	Faktor Keamanan	
			Deformasi (CCLRT)	Keterangan
1	I	2.9298	3.25	Aman
2	II	3.679	2.59	Aman
3	III	2.948	3.23	Aman
4	IV	3.9546	2.41	Aman

Adanya pembebanan AC sebesar 8.7 kN, perlu ditinjau juga deformasi yang terjadi pada komponen *roof* untuk melihat keamanan dari deformasi yang terjadi. Hasil perhitungan deformasi total yang terjadi dengan metode elemen hingga pada komponen *roof* disimpulkan pada tabel 4.5 dan hasil analisa terdapat pada lampiran 18.

**Tabel 4.5** Hasil Deformasi Total Maksimum pada Komponen *Roof*

No	Kasus	Deformasi Total (mm)	Faktor Keamanan	
			Deformasi (CCLRT)	Keterangan
1	I	1.9476	4.89	Aman
2	II	2.1745	4.38	Aman
3	III	1.9561	4.87	Aman
4	IV	2.3575	4.04	Aman



#### 4.2.2 Material Al 6005A-T6

Material Al 6005A-T6 ini menggantikan material Al 6061-T6 pada konstruksi *carbody* kereta LRT sehingga digunakan pada komponen *underframe*, *end wall*, *side wall*, dan *roof*. Sedangkan untuk *main support beam* masih menggunakan material SPA-H JIS (G-3125). Dengan mengikuti laporan perancangan LRT yang dibuat oleh “*Central Corridor Light Rail Transit*” pada tahun 2008 yang menerangkan bahwa batasan defleksi maksimum yang terjadi pada konstruksi *carbody* kereta LRT adalah sebesar 0.375 in atau 9.525 mm, konstruksi *carbody* kereta LRT dapat dikatakan aman, jika nilai deformasi total yang terjadi lebih kecil dari nilai batasan maksimum defleksi yang diperbolehkan sesuai laporan tersebut.

##### • Kasus Pembebanan I

Pembebanan yang didistribusikan pada kasus pembebanan I adalah pembebanan vertikal tanpa penumpang, dan pembebanan komponen. Deformasi total maksimum sebesar 2 mm terjadi pada komponen *underframe*.

$$\text{Nilai Faktor Keamanan Defleksi} = \frac{9.525}{2}$$

$$\text{Nilai Faktor Keamanan Defleksi} = 2.94$$

Jika hasil pada kasus pembebanan I dibandingkan dengan referensi laporan perancangan LRT “*Central Corridor Light Rail Transit*” menghasilkan angka keamanan untuk defleksi yang terjadi sebesar 2.94.

##### • Kasus Pembebanan II

Pembebanan yang didistribusikan pada kasus pembebanan II adalah pembebanan vertikal dengan kondisi penumpang penuh, dan pembebanan komponen. Deformasi total maksimum sebesar 4.5175 mm terjadi pada komponen *underframe*.

$$\text{Nilai Faktor Keamanan Defleksi} = \frac{9.525}{4.5175}$$

Nilai Faktor Keamanan Defleksi = 2.11

Jika hasil pada kasus pembebanan II dibandingkan dengan referensi laporan perancangan LRT “*Central Corridor Light Rail Transit*” menghasilkan angka keamanan untuk defleksi yang terjadi sebesar 2.11.

### • Kasus Pembebanan III

Pembebanan yang didistribusikan pada kasus pembebanan III adalah pembebanan vertikal tanpa penumpang, pembebanan komponen, dan pembebanan kompresi & pembebanan tarik. Deformasi total maksimum sebesar 3.2552 mm terjadi pada komponen *underframe*.

$$\text{Nilai Faktor Keamanan Defleksi} = \frac{9.525}{3.2552}$$

Nilai Faktor Keamanan Defleksi = 2.93

Jika hasil pada kasus pembebanan III dibandingkan dengan referensi laporan perancangan LRT “*Central Corridor Light Rail Transit*” menghasilkan angka keamanan untuk defleksi yang terjadi sebesar 2.93.

### • Kasus Pembebanan IV

Pembebanan yang didistribusikan pada kasus pembebanan IV adalah pembebanan vertikal tanpa penumpang, pembebanan komponen, dan pembebanan kompresi & pembebanan tarik. Deformasi total maksimum sebesar 4.5187 mm terjadi pada komponen *underframe*.

$$\text{Nilai Faktor Keamanan Defleksi} = \frac{9.525}{4.5187}$$

Nilai Faktor Keamanan Defleksi = 2.11

Jika hasil pada kasus pembebanan IV dibandingkan dengan referensi laporan perancangan LRT “*Central Corridor Light Rail Transit*” menghasilkan angka keamanan untuk defleksi yang terjadi sebesar 2.11.

Hasil perhitungan dengan metode elemen hingga dapat dilihat pada lampiran 19. Hasil deformasi total yang terjadi pada komponen *carbody* dengan material Al 6061-T6 disimpulkan pada Tabel 4.6.

**Tabel 4.6** Hasil Deformasi Total Maksimum pada Material Al 6005A-T6

No	Kasus	Deformasi Total (mm)	Faktor Keamanan Deformasi (CCLRT)	Keterangan
1	I	3.242	2.94	Aman
2	II	4.5175	2.11	Aman
3	III	3.2552	2.93	Aman
4	IV	4.5187	2.11	Aman

Adanya pembebanan AC sebesar 8.7 kN, perlu ditinjau juga deformasi yang terjadi pada komponen *roof* untuk melihat keamanan dari deformasi yang terjadi. Hasil perhitungan deformasi total yang terjadi dengan metode elemen hingga pada komponen *roof* disimpulkan pada tabel 4.7 dan hasil analisa terdapat pada lampiran 20.

**Tabel 4.7** Hasil Deformasi Total Maksimum pada Komponen *Roof*

No	Kasus	Deformasi Total (mm)	Faktor Keamanan Deformasi (CCLRT)	Keterangan
1	I	2.1785	4.37	Aman
2	II	2.7888	3.42	Aman
3	III	2.1864	4.36	Aman
4	IV	2.7897	3.41	Aman

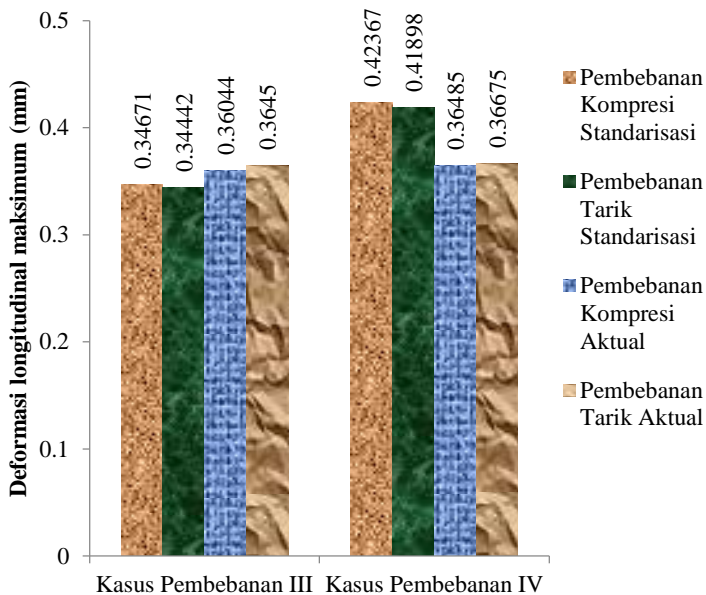
#### 4.2.3 Material SPA-H (JIS G 3125)

Adanya pembebanan kompresi sebesar 400 kN dan pembebanan tarik sebesar 300 kN (sesuai dengan standarisasi EN-12663-1:2010) dan pembebanan kompresi sebesar 344 kN dan pembebanan tarik sebesar 320 kN (sesuai dengan perhitungan aktual) pada komponen balok penyangga utama, perlu ditinjau deformasi yang terjadi pada komponen tersebut untuk mengetahui kemandirian dari nilai deformasi yang terjadi. Hasil perhitungan deformasi maksimum terhadap sumbu x dengan metode elemen hingga pada komponen *main support beam* dapat dilihat pada tabel 4.8. Dari hasil perhitungan metode elemen hingga, pada kasus pembebanan III didapatkan nilai deformasi maksimum terhadap sumbu x sebesar 0.41898 mm yang diakibatkan oleh pembebanan kompresi dan 0.34442 mm yang diakibatkan oleh pembebanan tarik sesuai dengan standarisasi EN-12663-1:2010, dan pada kasus pembebanan IV didapatkan nilai deformasi maksimum terhadap sumbu x sebesar 0.42367 mm yang diakibatkan oleh pembebanan kompresi dan 0.34671 mm yang diakibatkan oleh pembebanan tarik sesuai dengan standarisasi EN-12663-1:2010.

**Tabel 4.8** Hasil Deformasi Maksimum terhadap sumbu x pada  
*Main Support Beam*

No	Kasus	Pembebanan Kompresi dan Tarikan	Pembebanan	Deformasi Total (mm)	Keterangan
1	III	Standarisasi	Kompresi	0.41898	Aman
2			Tarik	0.34442	Aman
3		Perhitungan Aktual	Kompresi	0.36044	Aman
4			Tarik	0.3645	Aman

5	IV	Standarisasi	Kompresi	0.42367	Aman
6			Tarik	0.34671	Aman
7		Perhitungan Aktual	Kompresi	0.36485	Aman
8			Tarik	0.36675	Aman



**Gambar 4.1** Hasil deformasi pada arah longitudinal pada komponen *Main Support Beam*

Pada kasus pembebanan III sesuai dengan hasil perhitungan aktual didapatkan nilai deformasi maksimum terhadap sumbu x sebesar 0.36044 mm yang diakibatkan oleh pembebanan kompresi dan 0.3645 mm yang diakibatkan oleh pembebanan tarik, dan pada kasus pembebanan IV sesuai dengan hasil perhitungan aktual didapatkan nilai deformasi maksimum terhadap sumbu x sebesar 0.36485 mm yang diakibatkan oleh

pembebanan kompresi dan 0.36675 mm yang diakibatkan oleh pembebanan tarik. Hasil deformasi ini kurang dari 1 mm dan dapat dikategorikan nilai yang sangat kecil jika dibandingkan dengan standarisasi laporan CCLRT, sehingga dapat deformasi yang terjadi dapat dikatakan aman. Hasil perhitungan metode elemen hingga terlampir pada lampiran 21.

4.3 Pembahasan

4.3.1 Pembahasan Analisis Tegangan Von Mises Maksimum

Setelah melakukan proses perhitungan dengan metode elemen hingga, didapatkan data tegangan von mises maksimum seperti pada tabel 4.9 dan gambar 4.2. Dari data pada tabel 4.9 dapat diketahui bahwa pada kondisi kasus pembebanan I, II, III, dan IV dikatakan aman untuk material yang digunakan, karena persentase tegangan von mises maksimum terhadap tegangan mulur material yang dihasilkan dibawah 75% tegangan mulur material sesuai dengan Standarisasi Nasional PM 175 Tahun 2015.

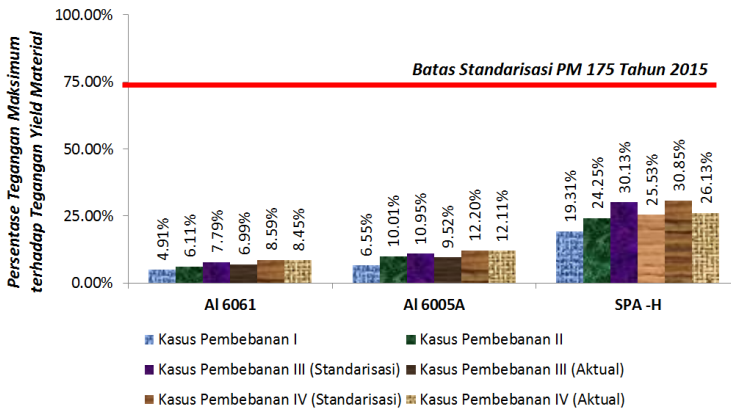
**Tabel 4.9** Hasil Analisis Tegangan Von Mises Maksimum

Kasus	Material	Tegangan Maksimum Von Mises (MPa)		% dari Tegangan Yield	Letak	Analisa Tegangan Von Mises
		Hasil Metode Elemen Hingga	Hasil Koreksi			
I	Al 6061	18.907	13.51	4.91%	Sudut jendela <i>Side Wall</i>	Aman
	Al 6005A	21.084	15.06	6.55%	Sudut jendela <i>Side Wall</i>	Aman
	SPA -H	95.946	68.53	19.31%	Sudut Balok Penyangga	Aman

II	Al 6061	23.507	16.79	6.11%	Sudut jendela <i>Side Wall</i>	Aman
	Al 6005A	32.228	23.02	10.01%	Sudut jendela <i>Side Wall</i>	Aman
	SPA -H	120.54	86.10	24.25%	Sudut Balok Penyangga	Aman
III	Al 6061	29.974	21.41	7.79%	Rangka <i>End Wall</i>	Aman
		26.912	19.22	6.99%	Rangka <i>End Wall</i>	Aman
	Al 6005A	35.244	25.17	10.95%	Rangka <i>End Wall</i>	Aman
		30.659	21.90	9.52%	Rangka <i>End Wall</i>	Aman
	SPA -H	149.74	106.96	30.13%	Sudut Balok Penyangga	Aman
		126.86	90.61	25.53%	Sudut Balok Penyangga	Aman
IV	Al 6061	33.056	23.61	8.59%	Sudut jendela <i>Side Wall</i>	Aman
		32.538	23.24	8.45%	Sudut jendela <i>Side Wall</i>	Aman
	Al 6005A	39.298	28.07	12.20%	Sudut jendela <i>Side Wall</i>	Aman
		38.995	27.85	12.11%	Sudut jendela <i>Side Wall</i>	Aman
	SPA -H	153.31	109.51	30.85%	Sudut Balok Penyangga	Aman
		129.88	92.77	26.13%	Sudut Balok Penyangga	Aman

Dari data hasil perhitungan dengan metode elemen hingga yang telah didapatkan, tegangan yang terjadi pada kasus pembebanan I, II, dan IV pada komponen dengan material Al

6061-T6 maupun Al 6005A-T6 terjadi pada daerah jendela. Hal ini selaras dengan kegagalan yang terjadi pada pesawat *de Havilland Cornet* yang dikarenakan tegangan konsentrasi pada sudut jendela, sehingga bentuk jendela pesawat diubah menjadi bulat. Begitupun pada *carboby* kereta LRT, tegangan terkonsentrasi pada sudut jendela namun nilai tegangan yang terjadi masih dikatakan aman karena bentuk sudut jendela sudah diberikan *fillet* sehingga sudut jendela tidak begitu tajam. Tegangan yang terjadi pada sudut jendela juga dikarenakan pada kasus pembebanan I dan II tidak diberikan pembebanan kompresi dan pembebanan tarik, sehingga pembebanan yang sangat berpengaruh pada kasus I dan II adalah pembebanan vertikal berat *carboby* dan berat penumpang. Maka dari itu tegangan terkonsentrasi pada sudut jendela pada komponen *side wall*. Begitupun untuk kasus pembebanan IV, meskipun ada pengaruh pembebanan kompresi dan pembebanan tarik, tegangan tetap terkonsentrasi pada sudut jendela dikarenakan pembebanan vertikal sebesar 410.5725 kN disertai pembebanan AC sebesar 8.7 kN lebih besar dibandingkan pembebanan kompresi sebesar 400kN dan pembebanan tarik sebesar 300kN.



**Gambar 4.2** Hasil Presentase Tegangan Maksimum terhadap Tegangan *Yield Material*



Namun pada kasus pembebanan III, tegangan von mises maksimum yang terjadi pada komponen dengan material Al 6061-T6 maupun Al 6005A-T6 terjadi pada daerah rangka *end wall*. Hal ini disebabkan karena pada kasus pembebanan III yang merupakan pembebanan vertikal tanpa penumpang, dengan pembebanan tarik dan pembebanan kompresi. Sehingga tegangan terkonsentrasi pada rangka *end wall* bagian bawah ini disebabkan karena pembebanan kompresi sebesar 400 kN yang lebih besar dari pembebanan vertikal tanpa penumpang sebesar 241.8 kN. Selain itu, tegangan dapat terkonsentrasi pada rangka bawah *end wall* dikarenakan komponen dengan material Al 6061-T6 maupun Al 6005A-T6 yang dekat dengan *housing coupler* (material SPA-H) adalah rangka bagian bawah *end wall*, sehingga tegangan maksimum dari balok penyangga berpindah dan terkonsentrasi pada rangka bagian bawah *end wall*.

Pada penelitian ini akan dibandingkan hasil analisa tegangan von mises antara material Al 6061-T6 dengan Al 6005A-T6. Data pada tabel 4.9 menunjukkan bahwa pada setiap kasus pembebanan, tegangan maksimum yang terjadi pada material Al 6005A-T6 lebih besar dibandingkan material Al 6061-T6, namun tegangan yang terjadi pada Al 6005A-T6 masih sesuai dengan standarisasi PM 175 Tahun 2015. Tegangan maksimum yang terjadi pada material Al 6005A-T6 lebih besar dibandingkan dengan material Al 6061-T6 ini dikarenakan tegangan mulur bahan Al 6005A-T6 (230 MPa) lebih kecil daripada tegangan mulur bahan Al 6061-T6 (275 MPa). Sehingga dapat disimpulkan bahwa, jika material Al 6061-T6 digantikan dengan material Al 6005A-T6 tetap lolos standarisasi material sesuai dengan standarisasi PM 175 Tahun 2015. Dari data pada tabel 4.1 dan 4.2, dapat dibandingkan nilai angka faktor keamanan material Al 6061-T6 dengan Al 6005A-T6 pada kasus pembebanan IV. Angka faktor keamanan untuk material Al 6061-T6 sebesar 11.83 dan untuk material Al 6005A-T6 sebesar 8.19.

Angka faktor keamanan 11.83 dapat dikategorikan terlalu aman, sehingga perlu dilakukan optimasi. Maka dari itu dilakukannya perubahan material dari Al 6061-T6 ke Al 6005A-T6 agar tidak *over design*. Menggunakan material Al 6005A-T6 dengan angka faktor keamanan 8.19 sudah dapat dikatakan cukup aman untuk diaplikasikan pada *carbody* kereta *Light Rail Transit*.

Tegangan yang terjadi pada komponen balok penyangga utama pada kasus pembebanan I dan II berada di letak yang sama, dapat dilihat pada lampiran 16. Hal ini dikarenakan pada kasus pembebanan I dan II tidak terdapat pembebanan kompresi dan pembebanan tarik, sehingga tegangan yang terkonsentrasi pada kasus pembebanan I dan II diakibatkan oleh pembebanan vertikal. Begitu juga pada pembebanan III dan IV, tegangan yang terjadi pada komponen balok penyangga berada di letak yang sama. Hal ini dikarenakan pada kasus pembebanan III dan IV terdapat pembebanan kompresi dan pembebanan tarik. Namun yang paling berpengaruh disini adalah pembebanan kompresi, dikarenakan pembebanan kompresi (400 kN) lebih besar dari pembebanan tarik (300 kN).

Hasil tegangan von mises maksimum yang didapatkan pada kasus pembebanan IV sebesar 109.51 MPa yang terjadi pada balok penyangga utama (SPA-H JIS G 3125) ini dapat dibandingkan dengan hasil tegangan von mises yang dianalisa oleh baykasoglu et. al. Kondisi batas kasus pembebanan IV serupa dengan kondisi batas pada analisa yang dilakukan oleh baykasoglu et. al., hanya berbeda pada nilai pembebanan dan tidak ada pembebanan komponen. Hasil tegangan von mises maksimum sebesar 109.51 MPa mendukung hasil tegangan von mises maksimum yang dilakukan baykasoglu et. al. sebesar 237.4 MPa. Meskipun nilai tegangan von mises maksimum berbeda, hal ini dikarenakan model *carbody* yang berbeda, detail *material properties* yang berbeda, dan nilai pembebanan yang berbeda. Pembebanan tarik yang diterapkan oleh baykasoglu sebesar 100 ton dan pembebanan kompresi sebesar 200 ton, sedangkan pada

penelitian ini pembebanan kompresi yang diberikan sebesar 400kN dan pembebanan tarik sebesar 300 kN. Dari nilai pembebanan ini dapat diketahui bahwa nilai tegangan yang didapatkan Baykasoglu lebih besar dari nilai tegangan yang didapatkan pada penelitian ini dikarenakan nilai pembebanan yang Baykasoglu gunakan lebih besar dari nilai pembebanan pada penelitian ini. Hasil tegangan von mises maksimum yang didapatkan lebih kecil dari hasil baykasoglu et. al. ini disebabkan perbedaan kontruksi *carbody* juga. Kontruksi *carbody* yang dianalisis oleh baykasoglu merupakan kereta api penumpang pada umumnya, sedangkan kontruksi *carbody* yang dianalisis pada penelitian ini merupakan kereta api penumpang listrik ringan (LRT).

Tegangan von mises maksimum pada kasus pembebanan IV dijadikan sebagai acuan untuk menentukan angka faktor keamanan untuk desain kontruksi *carbody* kereta LRT. Sehingga didapatkan angka faktor keamanan dengan perhitungan :

$$\text{Tegangan Von Mises Maksimum} = 109.51 \text{ MPa}$$

$$\text{Letak terjadinya tegangan} = \text{Balok penyangga utama}$$

$$\text{Tegangan Mulur Bahan} = 355 \text{ MPa}$$

$$\text{Angka Faktor Keamanan} = \frac{355}{109.51} = 3.24$$

Kasus pembebanan IV dijadikan sebagai acuan, dikarenakan pada kasus pembebanan ini merupakan pembebanan maksimum dengan nilai pembebanan kondisi penuh penumpang, dengan pembebanan komponen, pembebanan kompresi dan pembebanan tarik. Maka angka faktor keamanan untuk kontruksi *carbody* kereta LRT bernilai 3.24. Angka faktor keamanan 3.24 dikatakan aman, karena pada analisis ini mengacu pada standarisasi PM 175 Tahun 2015 tentang persentase tegangan maksimum yang terjadi terhadap tegangan mulur bahan material. Karena pada angka 3.24 ini mengartikan perbandingan tegangan

maksimum terhadap tegangan mulur bahan material sebesar 30.85%, nilai persentase ini masih dibawah nilai 75% sesuai dengan standarisasi PM 175 Tahun 2015.

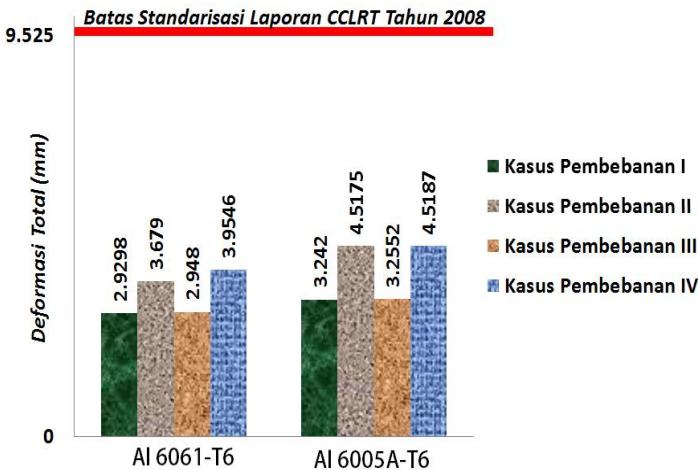
#### 4.3.2 Pembahasan Analisis Deformasi Total Maksimum

Setelah melakukan proses perhitungan dengan metode elemen hingga, didapatkan data deformasi total maksimum seperti pada tabel 4.10. Dapat diketahui bahwa baik pada kasus pembebanan I, II, III, maupun IV, hasil deformasi total dengan komponen material Al 6005A-T6 lebih besar dibandingkan dengan hasil deformasi total dengan komponen material AL 6061-T6. Hal ini disebabkan nilai dari tegangan mulur bahan material Al 6005A-T6 lebih kecil dibandingkan tegangan mulur bahan Al 6061-T6.

**Tabel 4.10** Hasil Analisis Deformasi Total Maksimum

Kasus	Material	Hasil Deformasi Total (mm)	Faktor Keamanan Deformasi
I	Al 6061	2.9298	3.25
	Al 6005A	3.242	2.94
II	Al 6061	3.679	2.59
	Al 6005A	4.5175	2.11
III	Al 6061	2.948	3.23
	Al 6005A	3.2552	2.93
IV	Al 6061	3.9546	2.41
	Al 6005A	4.5187	2.11

Meskipun hasil deformasi total dengan menggunakan material Al 6005-T6 lebih besar dibandingkan dengan menggunakan material Al 6061-T6 pada semua kasus pembebanan, hasil deformasi total dengan menggunakan material Al 6005A-T6 masih sesuai dengan standarisasi defleksi pada laporan CCLRT.



**Gambar 4.3** Hasil Deformasi Total

Jika ditinjau pada kasus pembebanan I dan kasus pembebanan II, hasil deformasi total pada saat kondisi penuh penumpang (kasus II) lebih besar dibandingkan pada saat kondisi tanpa penumpang (kasus I). Begitu pula pada kasus pembebanan III dan kasus pembebanan IV, hasil deformasi total pada saat kondisi penuh penumpang dengan pembebanan kompresi dan tarik (kasus IV) lebih besar dibandingkan pada saat kondisi tanpa penumpang dengan pembebanan kompresi dan tarik (pembebanan III). Hasil ini selaras dengan hasil simulasi dan eksperimen yang dilakukan oleh Baykasoglu et. al. Pada penelitiannya, Baykasoglu et. al. menghasilkan peningkatan deformasi total, dari 5.1245 mm (kondisi tanpa penumpang) hingga 7.683 mm (kondisi penumpang penuh). Penelitian perhitungan dengan metode elemen hingga yang dilakukan oleh Baykasoglu et. al. menjadi acuan, dikarenakan pada penelitiannya Baykasoglu et. al. melakukan validasi dengan eksperimen. Sehingga peningkatan deformasi total ini dapat dikatakan valid, karena sesuai dengan penelitian Baykasoglu et. al.

Dengan meninjau kasus pembebanan I dan III, yang membedakan diantara keduanya adalah ada tidaknya pembebanan kompresi dan pembebanan tarik. Hasil deformasi total kasus pembebanan I dan III baik dengan material Al 6005A-T6 maupun dengan material Al 6061-T6 cenderung menghasilkan deformasi total yang tidak berbeda jauh secara signifikan. Untuk material Al 6061-T6 menghasilkan perbedaan sebesar 0.62% pada perbedaan deformasi total kasus pembebanan I dan III, dan untuk material Al 6005A-T6 menghasilkan perbedaan sebesar 0.41%. Sehingga dari kedua data ini dapat disimpulkan efek dari pembebanan kompresi dan pembebanan tarik pada kontruksi *carbody* kereta LRT tidak berpengaruh besar pada hasil deformasi total. Begitu juga, dengan meninjau kasus pembebanan II dan IV, hasil deformasi total tidak berbeda jauh baik dengan material Al 6005A-T6 maupun dengan material Al 6061-T6.

Hasil deformasi total pada kasus pembebanan II sedikit berbeda jika dibandingkan dengan hasil deformasi total dari analisis Belete Jirru. Kedua hasil ini dapat dibandingkan karena menggunakan kondisi batas yang cenderung sama, yaitu tanpa adanya pembebanan kompresi dan pembebanan tarik. Hasil deformasi total yang didapatkan oleh Belete Jirru sebesar 4.2897 mm lebih besar dibandingkan dengan hasil deformasi total dari perhitungan yang telah dilakukan pada material Al 6061-T6 dengan nilai 3.679 mm. Namun hasil deformasi total yang didapatkan oleh Belete Jirru lebih kecil dibandingkan dengan hasil deformasi total dari perhitungan pada material Al 6005A-T6. Perbedaan ini dikarenakan model kontruksi *carbody* kereta sangat jauh berbeda, material yang digunakan pada kontruksi *carbody* berbeda dan nilai pembebanan yang berbeda. Model kontruksi *carbody* kereta yang dianalisis oleh Belete Jirru merupakan kontruksi kereta api penumpang dengan material *steel*, dan pembebanan yang diberikan pada perhitungan metode elemen hingga sebesar 29820 Pa atau 1460 kN (dengan mengalikan luasan *underframe* kereta Belete Jirru).

Kasus pembebanan IV dijadikan sebagai acuan, dikarenakan pada kasus pembebanan ini merupakan pembebanan maksimum dengan nilai pembebanan kondisi penuh penumpang, dengan pembebanan komponen, pembebanan kompresi dan pembebanan tarik. Dengan angka faktor keamanan defleksi sebesar 2.11, kontruksi *carboby* kereta LRT sudah dapat dikatakan aman dengan menggunakan material Al 6005A-T6. Angka faktor keamanan 2.11 dikatakan aman, karena pada analisis ini mengacu pada standarisasi laporan perancangan LRT yang dibuat oleh “*Central Corridor Light Rail Transit*” pada tahun 2008 yang menerangkan bahwa batasan defleksi maksimum yang terjadi pada kontruksi *carboby* kereta LRT adalah sebesar 0.375 in atau 9.525 mm. Karena pada angka faktor keamanan 2.11 menjelaskan deformasi total yang terjadi sebesar 4.5187 mm, nilai deformasi total tersebut berada dibawah batas nilai defleksi maksimum yang terjadi (9.525 mm) pada laporan perancangan CCLRT.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*



## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari proses perhitungan dengan metode elemen hingga pada model konstruksi *carbody* kereta LRT Palembang dengan meninjau aspek analisis tegangan ekuivalen *von mises* dan analisis deformasi total yang memvariasikan 4 kasus pembebanan dan variasi material Al 6061 T-6 & material Al 6005A-T6, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. a. Nilai tegangan ekuivalen *von mises* maksimum sebesar 109.51 MPa yang terkonsentrasi pada sudut balok penyangga (material SPA-H JIS G3125) dengan persentase terhadap tegangan mulur bahan (355 MPa) sebesar 30.85% dapat dinyatakan aman karena nilai persentase berada dibawah nilai 75% sesuai dengan standarisasi PM 175 Tahun 2015.
- b. Nilai tegangan ekuivalen *von mises* maksimum yang terjadi pada material Al 6061-T6 sebesar 23.24 MPa yang terkonsentrasi pada sudut jendela *Side Wall* dinyatakan aman karena persentase terhadap tegangan mulur bahan (275 MPa) sebesar 8.45% berada dibawah nilai 75% sesuai dengan standarisasi PM 175 Tahun 2015.
- c. Nilai tegangan ekuivalen *von mises* maksimum yang terjadi pada material Al 6005A-T6 sebesar 28.07 MPa yang terkonsentrasi pada sudut jendela *Side Wall* dinyatakan aman karena persentase terhadap tegangan mulur bahan (230 MPa) sebesar 12.20% berada dibawah nilai 75% sesuai dengan standarisasi PM 175 Tahun 2015.

2. a. Nilai deformasi total maksimum sebesar 3.9546 mm (jika menggunakan material Al 6061-T6) terjadi pada komponen *underframe* dapat dinyatakan aman karena nilai deformasi total lebih kecil dari 0.375 in atau 9.525 mm sesuai dengan laporan perancangan LRT yang dibuat oleh *Central Corridor Light Rail Transit* pada tahun 2008.
- b. Nilai deformasi total maksimum sebesar 4.5187 mm (jika menggunakan material Al 6005A-T6) terjadi pada komponen *underframe* dapat dinyatakan aman karena nilai deformasi total lebih kecil dari 0.375 in atau 9.525 mm sesuai dengan laporan perancangan LRT yang dibuat oleh *Central Corridor Light Rail Transit* pada tahun 2008.
3. Angka faktor keamanan kontruksi *carbody* kereta LRT Palembang secara keseluruhan bernilai 3.24 (dari hasil analisis tegangan *von mises* maksimum).
4. Material Al 6061-T6 dengan angka faktor keamanan 11.83 (dari hasil analisis tegangan *von mises* maksimum) dikategorikan sangat aman, sehingga lebih baik diganti oleh material Al 6005A-T6 dengan angka faktor keamanan 8.19 (dari hasil analisis tegangan *von mises* maksimum), dikarenakan dengan material Al 6005A-T6 sudah dikategorikan aman jika digunakan pada kontruksi *carbody* kereta LRT.
5. Pembebanan kompresi dan pembebanan tarik tidak berpengaruh besar terhadap perubahan deformasi total maksimum, karena perubahan deformasi total yang diakibatkan pembebanan kompresi dan tarik sebesar 0.62% (material Al 6061-T6) dan 0.41% (material Al 6005A-T6).
6. Deformasi total maksimum yang terjadi pada komponen *roof* sebesar 2.3575 mm (jika menggunakan

material Al 6061-T6) dan 2.7897 mm (jika menggunakan material Al 6005A-T6) dinyatakan aman karena nilai deformasi total berada dibawah batasan 0.375 in atau 9.525 mm sesuai dengan laporan perancangan LRT yang dibuat oleh *Central Corridor Light Rail Transit* pada tahun 2008.

## 5.2 Saran

Demi kelancaran proses perhitungan dengan metode elemen hingga pada model kontruksi *carbody* kereta LRT disarankan untuk menyiapkan perangkat hardware dengan kapasitas RAM diatas 16GB, dikarenakan model kontruksi *carbody* kereta LRT ini akan menghasilkan banyak *node* dan *element* mesh sehingga dibutuhkan kapasitas RAM hardware diatas 16GB untuk menyelesaikan perhitungan dengan metode elemen hingga. Serta untuk meninjau lebih lanjut penelitian tentang analisa statik struktural, perlu dilakukannya proses perhitungan dengan metode elemen hingga menggunakan elemen *solid* agar dapat diketahui perbedaan hasil antara elemen *shell* dengan elemen *solid*. Namun perlu dipersiapkan kapasitas RAM lebih dari 16GB untuk proses perhitungan metode elemen hingga dengan elemen solid. Perlu ditambahkannya analisa-analisa lain, seperti analisa modal dan analisa *fatigue* pada kontruksi *carbody* kereta LRT Palembang untuk menunjang data dalam proses pengembangan dan perancangan kontruksi *carbody* kereta LRT di Indonesia.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*

## DAFTAR PUSTAKA

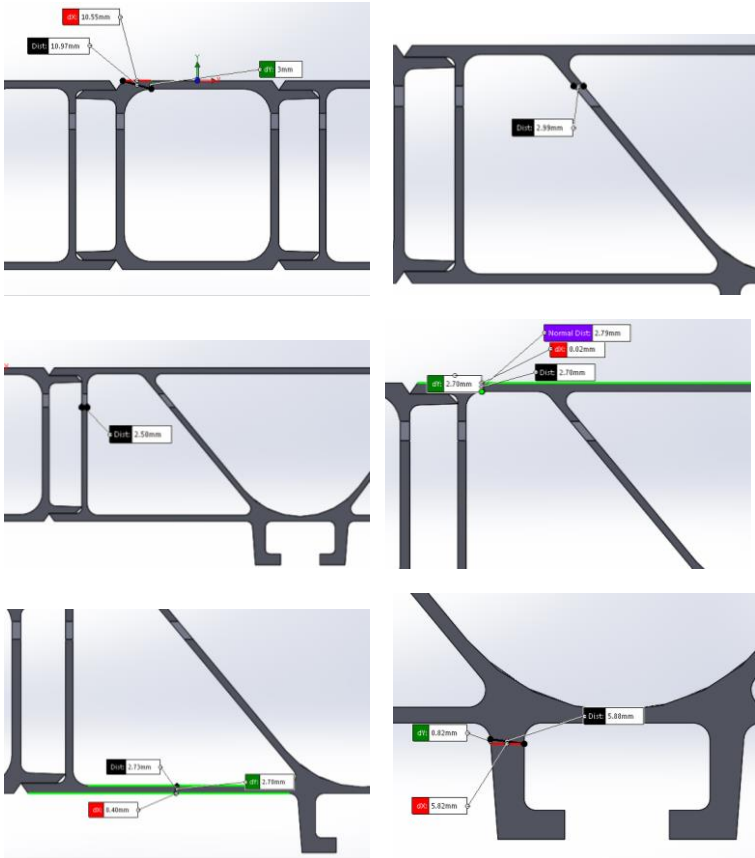
- [1] Randell, N. 2011. **Fast Tracking Rail Vehicle Design**. Bombardier. United Kingdom.
- [2] Baykasoglu, C. 2012. *Numerical Static and Dynamic Stress Analysis on Railway Passenger And Freight Car Models*. Jurnal Internasional. Karabuk, Turkiye.
- [3] Jirru, B. 2015. *Modeling and Structural Analysis of railway Vehicle body with Finite Element method*, PhD Thesis. Addis Ababa University, Etiopia.
- [4] Spiryagin, M. 2014. *Design and Simulation of Rail Vehicles*. London : CRC Press
- [5] Ardhian, A. 2016. *Spesifikasi Teknis 8 (Delapan) Trainset LRT Palembang*. Madiun : PT. INKA.
- [6] Cook, R. D. 1995. *Finite Element Modelling for Stress Analysis*. United States of America : Pearson Education, Inc.
- [7] Syah, K. 2017. *Analisis Deformasi pada Stent Asymmetric dengan Variasi Tipe Connector*. Tugas Akhir. Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [8] Bhatti, M. A. 2005. *Fundamentals Finite Element Analysis and Applications*. John Willey & Sons, Inc.
- [9] ANSYS 12.0. USA: ANSYS, Inc : 2009.
- [10] British Standard. 2010. *Railway applications – Structural requirements of railway vehicle bodies (BS EN 12663-1:2010)*. Chiswick High Road, London : BSI Group.
- [11] Menteri Perhubungan Republik Indonesia. 2015. **PERATURAN MENTERI PERHUBUNGAN REPUBLIK INDONESIA NOMOR : PM 175 TAHUN 2015 Tentang “Standar Spesifikasi Teknis Kereta Kecepatan Normal Dengan Penggerak Sendiri”**. Jakarta.

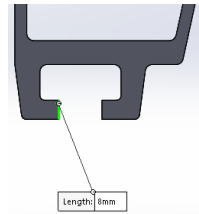
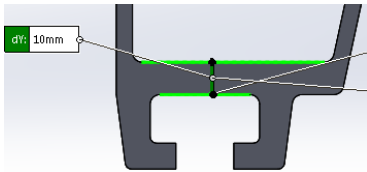
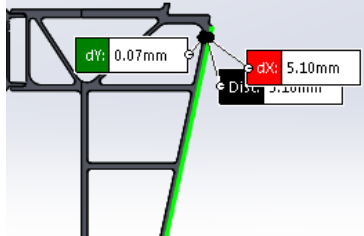
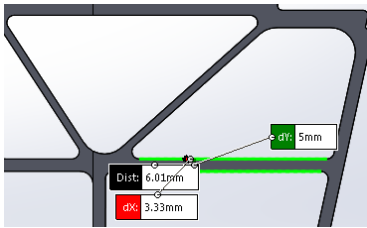
- [12] Harris, D.M.J.M., 2008. *Report for Design Criteria. Central Corridor Light Rail Transit. Federal Transit Administration, U. S. Department of Transportation.*
- [13] Hibbeler, R.C. 2008. *Mechanics of Materials.* Canada : Pearson Prentice Hall
- [14] Bower, A. F. 2008. *Applied Mechanics of Solids.* Brown University, Providence, Rhode Island, USA : CRC Press
- [15] Nusyirwan. 2010. *Analisis Untuk Menentukan Faktor Konsentrasi Tegangan Dengan Eksperimental Dengan Eksperimental dan Metode Elemen Hingga.* Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin. Universitas Andalas, Padang.
- [16] Deuchman, A. 1975. *Machine Design Theory and Practice.* Mac Millan Publishing Co., New York.
- [17] Aalco Metals Ltd. 2016. *Aluminium Alloy 6061-T6 Extrusion.* Unit 6 Parkway Industrial Estate, Wednesbury WS10 7WP.
- [18] Aalco Metals Ltd. 2016. *Aluminium Alloy 6005A-T6 Extrusion.* Unit 6 Parkway Industrial Estate, Wednesbury WS10 7WP.
- [19] Jan, L. M. R. 2015. *Measurements of friction coefficients between rails lubricated with a friction modifier and the wheels of an IORE locomotive during real working conditions.* Wear, 109-117.

## LAMPIRAN

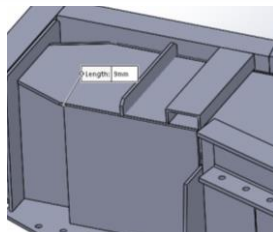
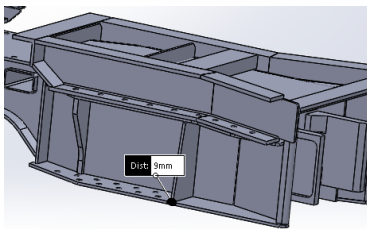
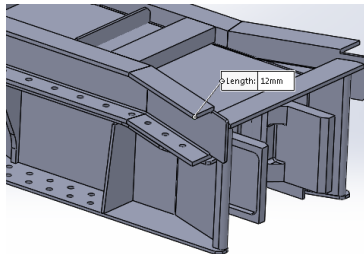
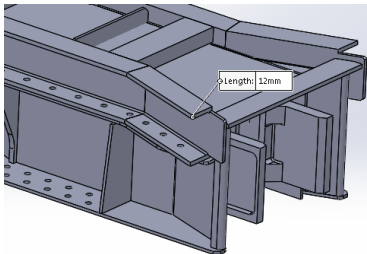
### Lampiran 1 : Data Ketebalan Komponen *Carbody*

#### 1. Ketebalan pada komponen *Underframe*

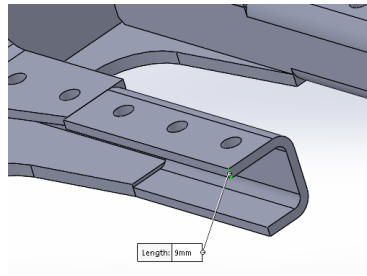
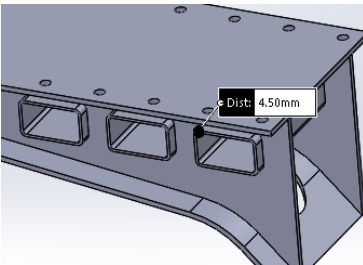
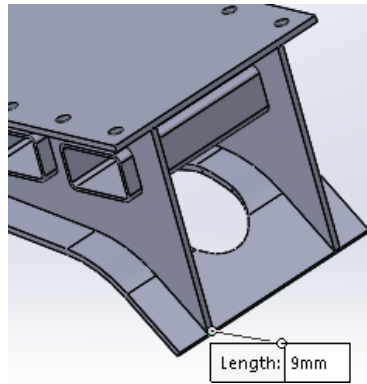
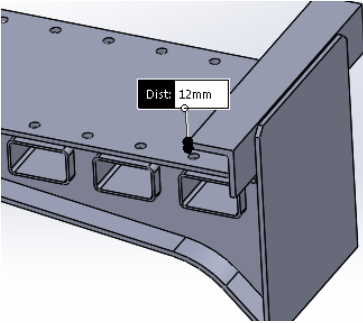
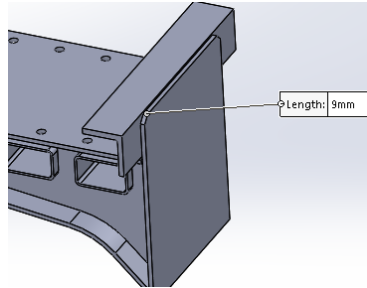
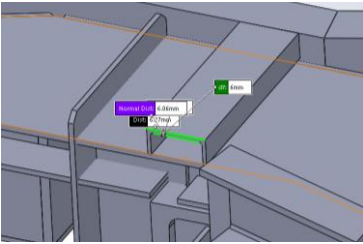


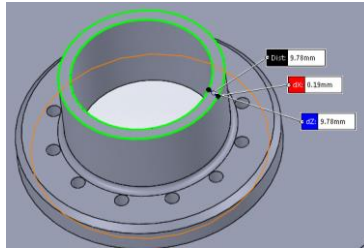
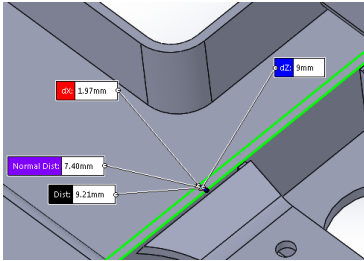


## 2. Ketebalan pada komponen *Main Support Beam*

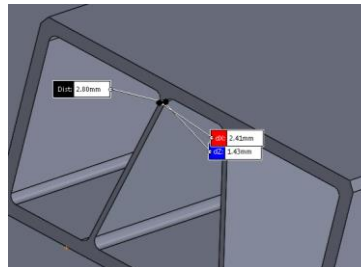
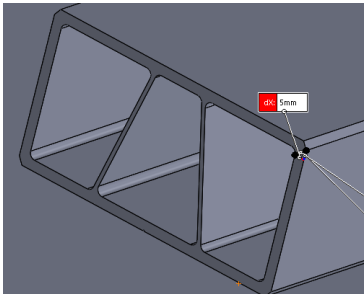
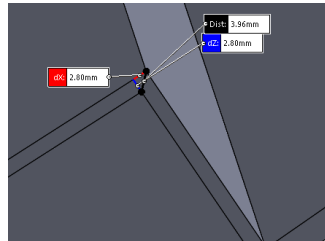
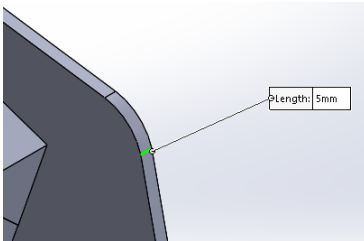




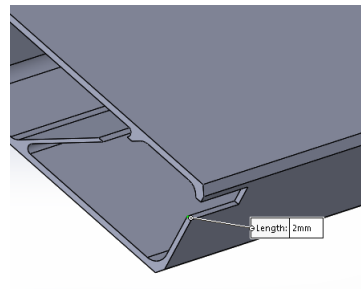
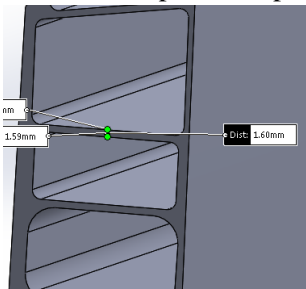


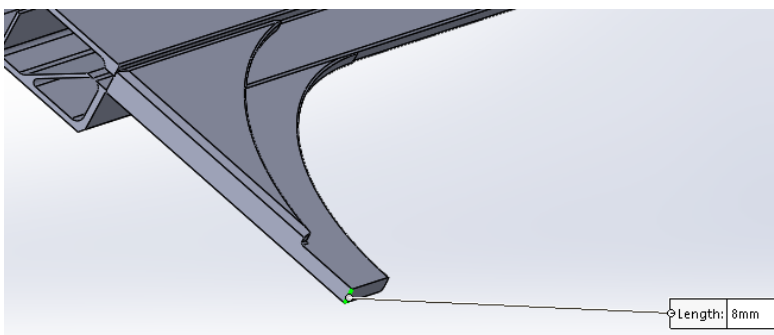
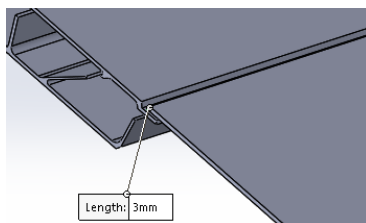
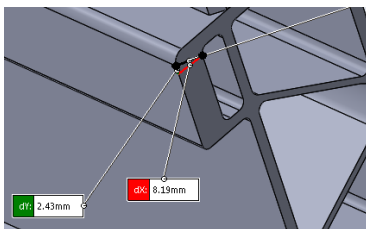


### 3. Ketebalan pada komponen *End Wall*

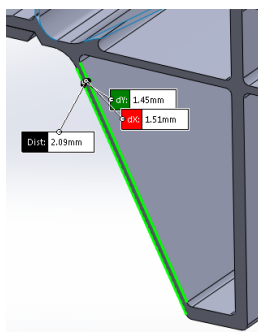
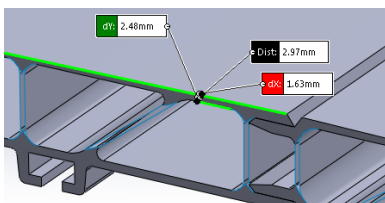
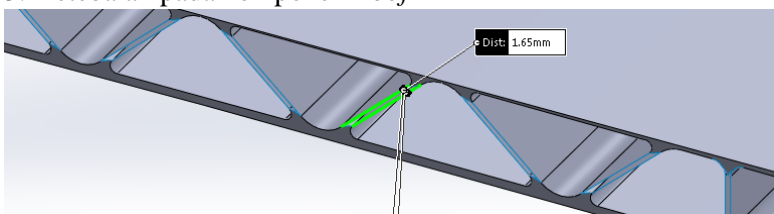


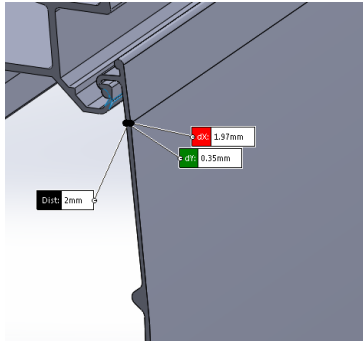
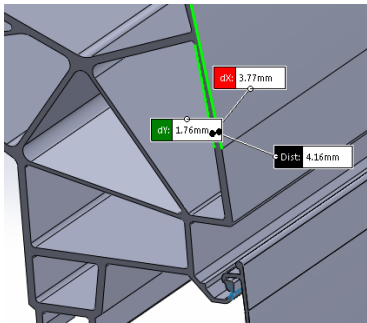
### 4. Ketebalan pada komponen *Side Wall*





## 5. Ketebalan pada komponen *Roof*





## Lampiran 2 : Data Ketebalan Komponen *Carbody* yang diberikan pada *Element Shell*

Komponen <i>Underframe</i>		Komponen <i>Balok Penyangga</i>		Komponen <i>End Wall</i>	
Part	Ketebalan	Part	Ketebalan	Part	Ketebalan
1	2.9 mm	1	9 mm	1	5 mm
2	2.9 mm	2	9 mm	2	5 mm
3	2.9 mm	3	9 mm	3	5 mm
4	2.9 mm	4	9 mm	4	5 mm
5	2.9 mm	5	9 mm	5	5 mm
6	2.9 mm	6	9 mm	6	5 mm
7	2.9 mm	7	9 mm	7	5 mm
8	2.9 mm	8	9 mm	8	2.8 mm
9	2.9 mm	9	9 mm	9	2.8 mm
10	2.9 mm	10	9 mm	10	2.8 mm
11	2.9 mm	11	9 mm	11	2.8 mm
12	2.9 mm	12	9 mm	12	2.8 mm
13	2.9 mm	13	9 mm	13	2.8 mm
14	2.9 mm	14	9 mm	14	2.8 mm
15	2.9 mm	15	9 mm	15	2.8 mm
16	2.9 mm	16	9 mm		

17	3 mm	17	9 mm
18	3 mm	18	9 mm
19	3 mm	19	9 mm
20	3 mm	20	9 mm
21	5 mm	21	9 mm
22	5 mm	22	9 mm
23	5 mm	23	9 mm
24	5 mm	24	10 mm
25	5 mm	25	12 mm
26	5 mm	26	6 mm
27	5 mm	27	6 mm
28	8 mm	28	4.5 mm
29	8 mm	29	4.5 mm
30	10 mm	30	4.5 mm
31	2.7 mm		
32	2.7 mm		

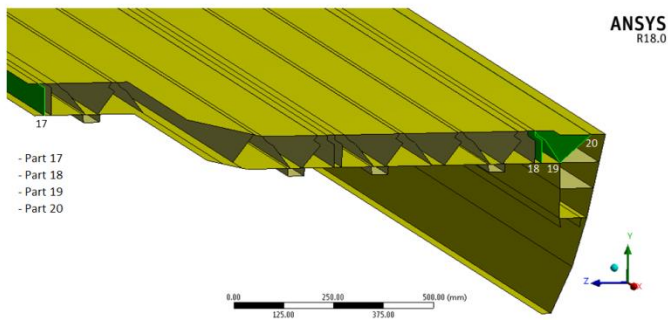
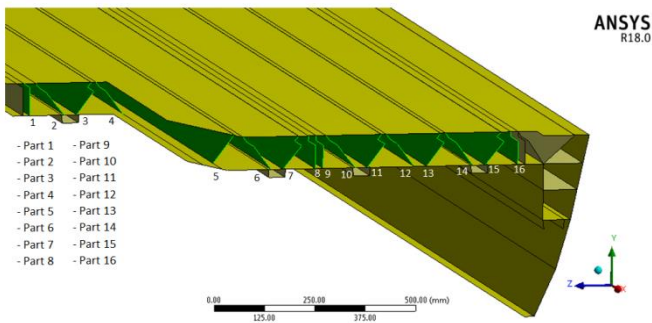
Komponen Roof		10	2 mm	22	2 mm
Part	Ketebalan	11	2 mm	23	2 mm
1	2 mm	12	2 mm	24	2 mm
2	2 mm	13	2 mm	25	2 mm
3	2 mm	14	2 mm	26	2 mm
4	2 mm	15	2 mm	27	2 mm
5	2 mm	16	2 mm	28	2 mm
6	2 mm	17	2 mm	29	2 mm
7	2 mm	18	2 mm	30	2 mm
8	2 mm	19	2 mm	31	2 mm
9	2 mm	20	2 mm	32	2 mm
		21	2 mm	33	2 mm

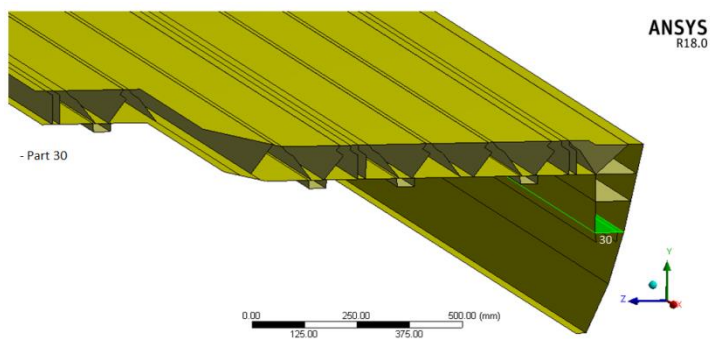
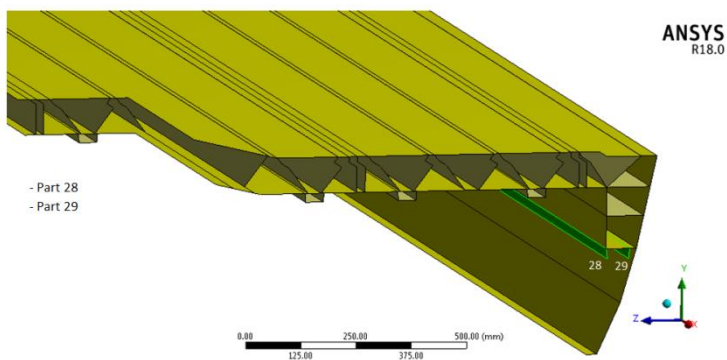
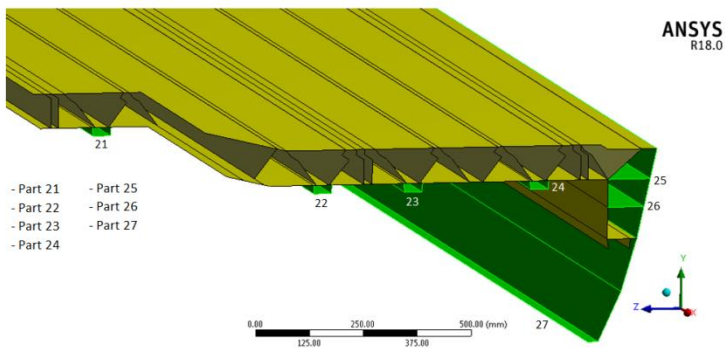
34	2 mm
35	2 mm
36	2 mm
37	2 mm
38	2 mm
39	3 mm
40	3 mm
41	3 mm
42	3 mm
43	3 mm
44	3 mm
45	3 mm
46	4 mm
47	4 mm

<b>Komponen</b>		12	2 mm	26	1.6 mm	40	1.6 mm
<b>Side Wall</b>		13	2 mm	27	1.6 mm	41	1.6 mm
Part	Ketebalan	14	2 mm	28	1.6 mm	42	1.6 mm
1	2 mm	15	2 mm	29	1.6 mm	43	1.6 mm
2	2 mm	16	2 mm	30	1.6 mm	44	2 mm
3	2 mm	17	2 mm	31	1.6 mm	45	2 mm
4	2 mm	18	2 mm	32	1.6 mm	46	2 mm
5	2 mm	19	2 mm	33	1.6 mm	47	2 mm
6	2 mm	20	2 mm	34	1.6 mm	48	2 mm
7	2 mm	21	2 mm	35	1.6 mm	49	2 mm
8	2 mm	22	2 mm	36	1.6 mm	50	2 mm
9	2 mm	23	2 mm	37	2 mm	51	2 mm
10	2 mm	24	1.6 mm	38	1.6 mm	52	2 mm
11	2 mm	25	1.6 mm	39	1.6 mm	53	2 mm

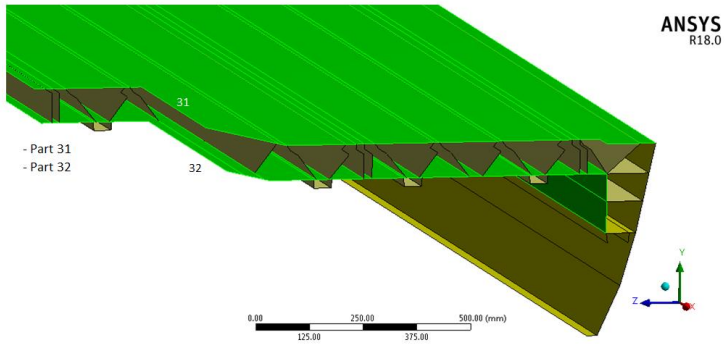
54	2 mm
55	3 mm
56	8 mm
57	8 mm
58	8 mm
59	8 mm
60	8 mm
61	8 mm
62	8 mm
63	2 mm
64	2 mm
65	2 mm

### 1. Data ketebalan *underframe*

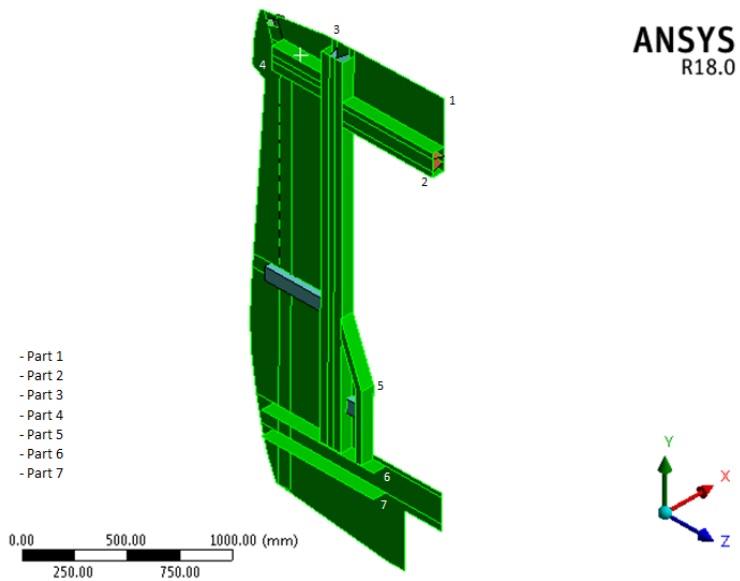


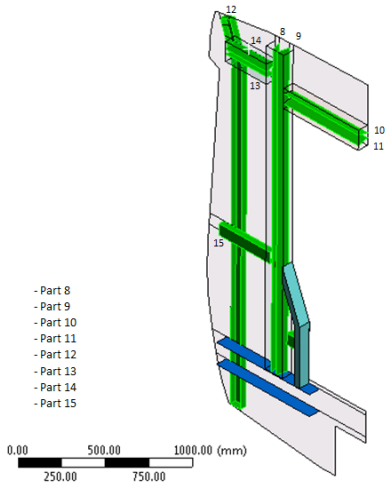






## 2. Data ketebalan *end wall*

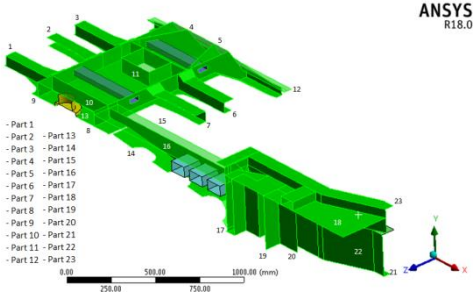




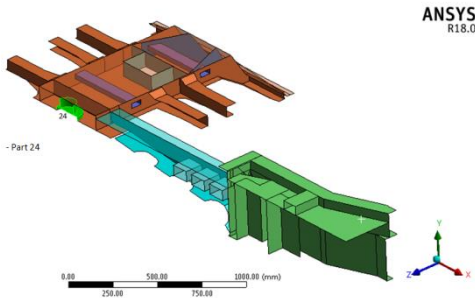
ANSYS  
R18.0



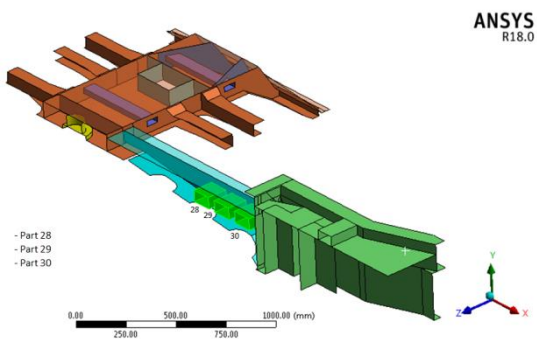
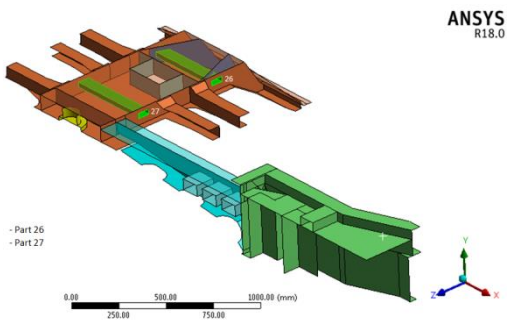
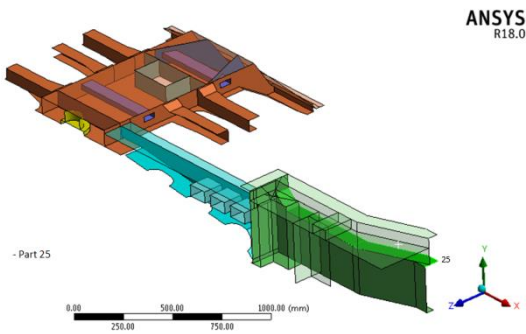
### 3. Data ketebalan *main support beam*



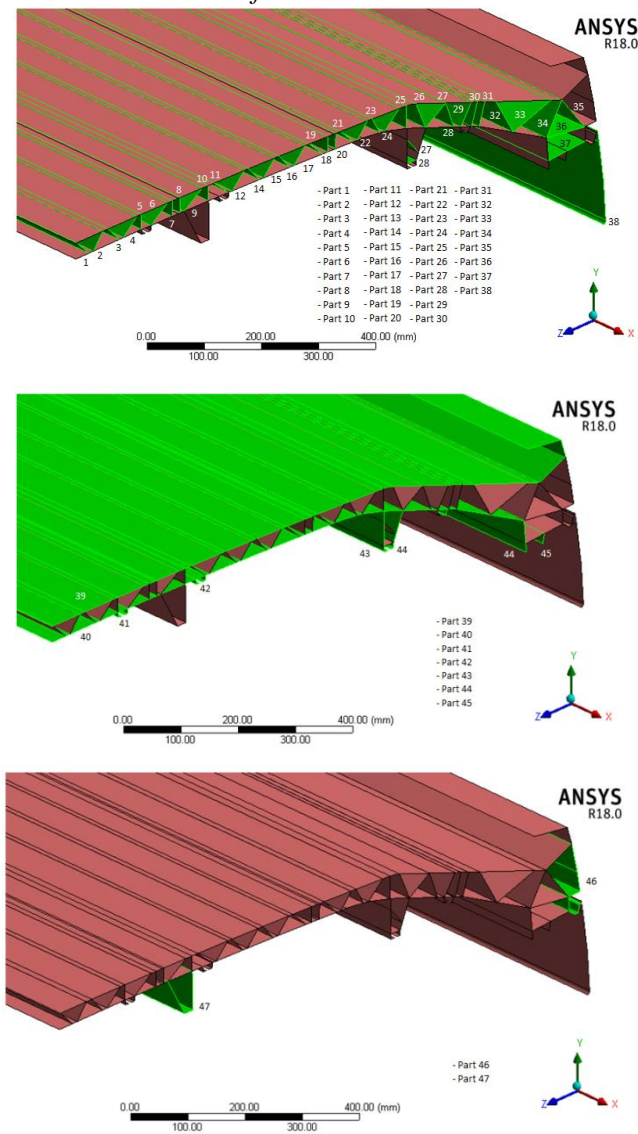
ANSYS  
R18.0



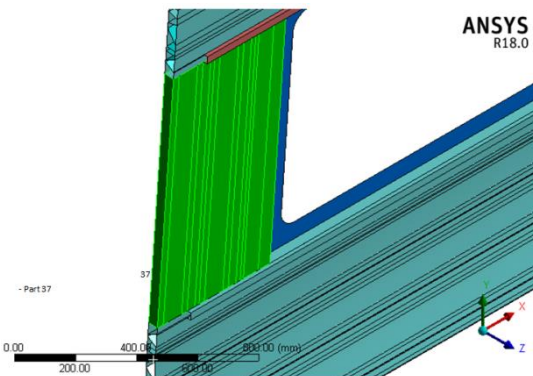
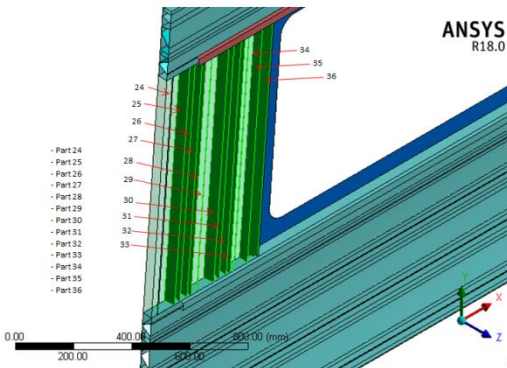
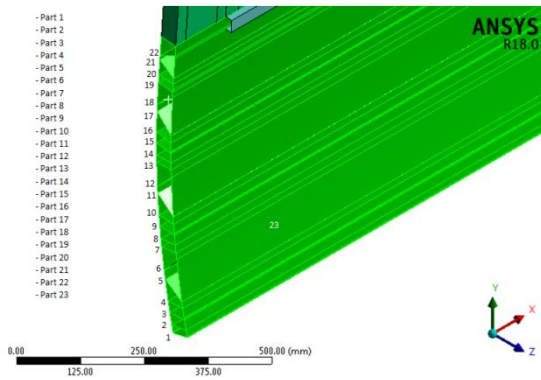
ANSYS  
R18.0

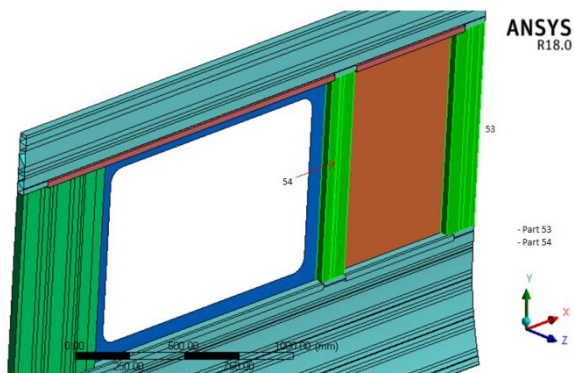
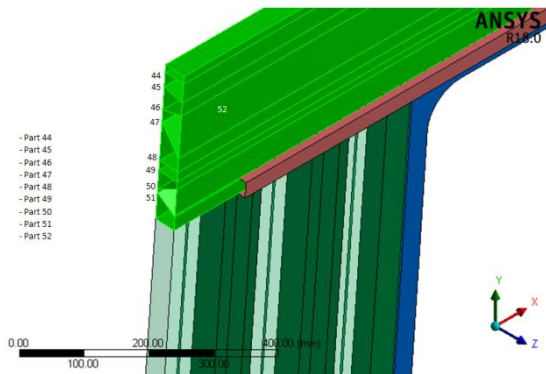
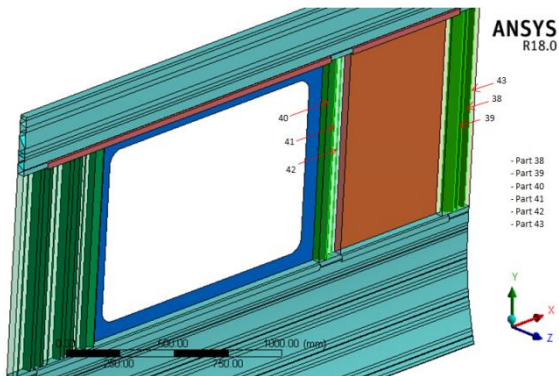


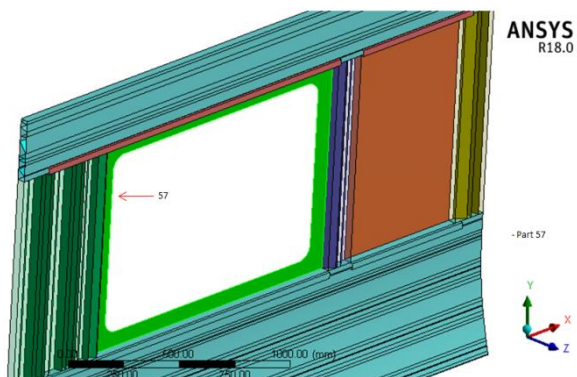
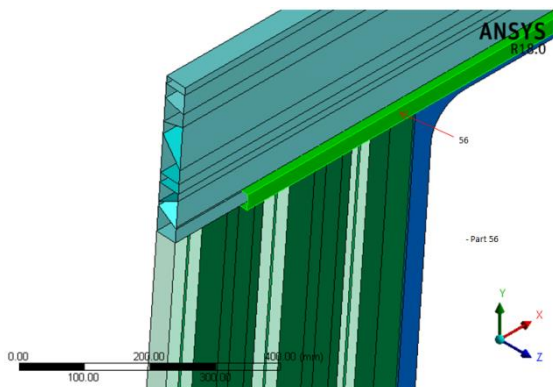
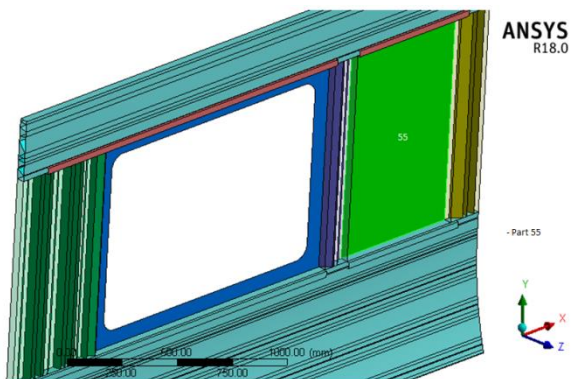
4. Data ketebalan *roof*



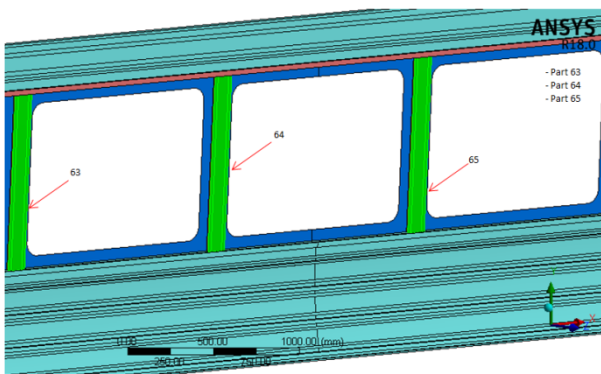
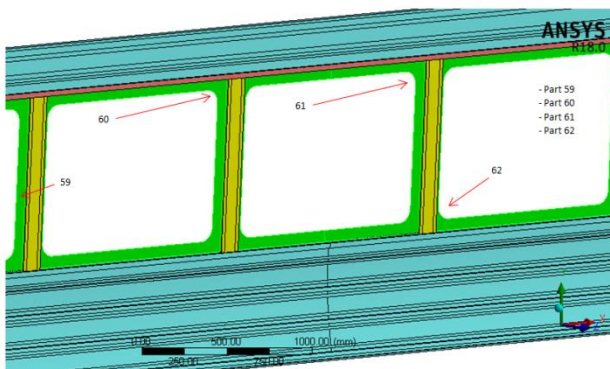
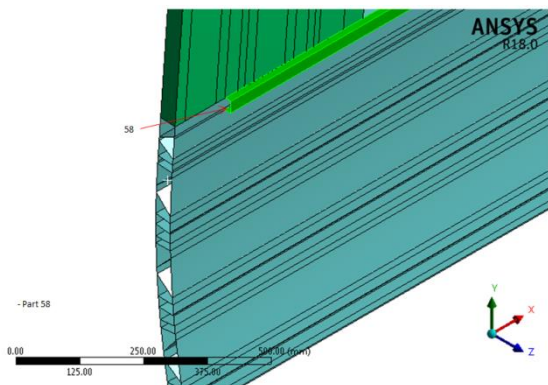
## 5. Data ketebalan *side wal*







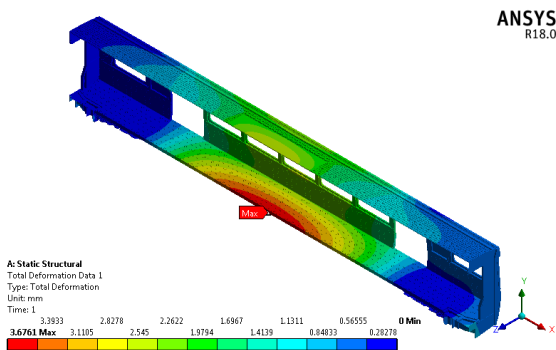
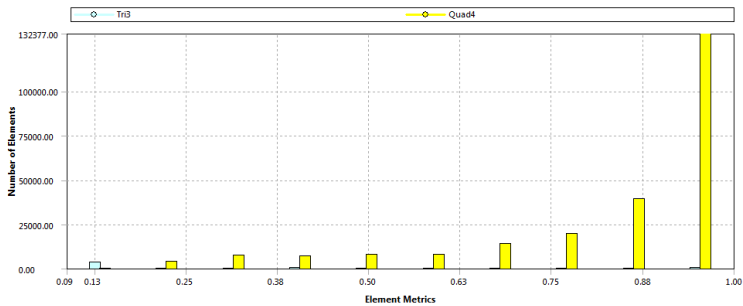
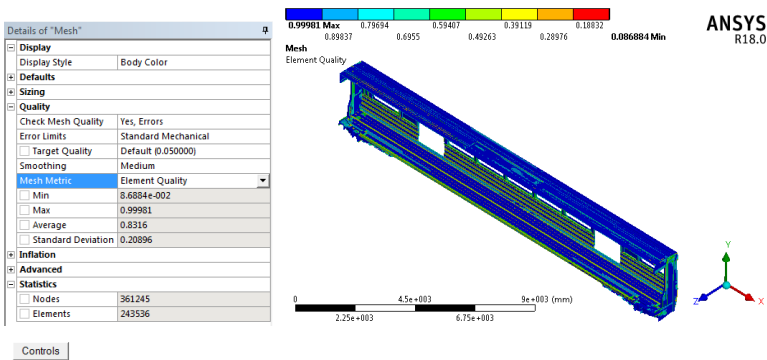


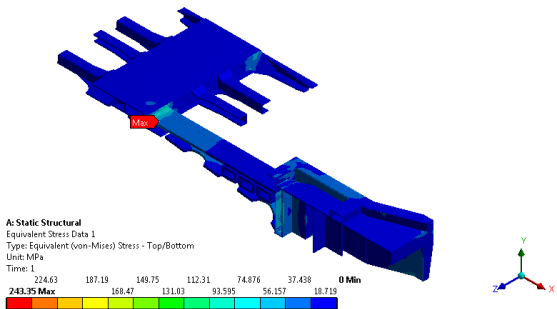




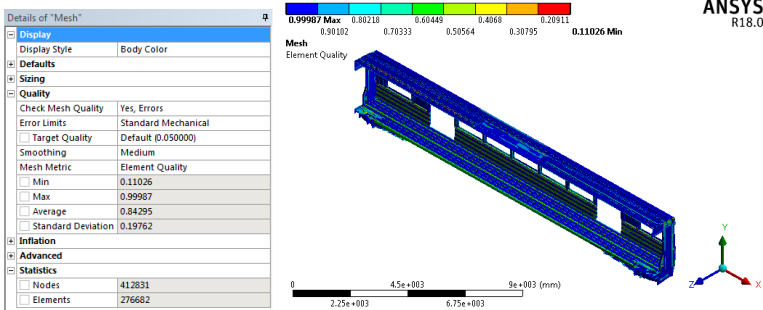
Lampiran 3 : Data Hasil Simulasi untuk Analisis *Mesh Convergent Test*

Data 1

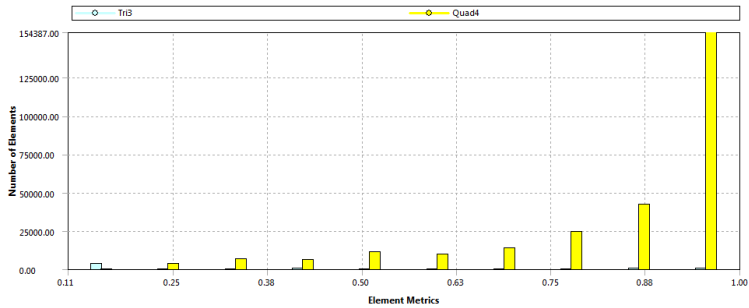


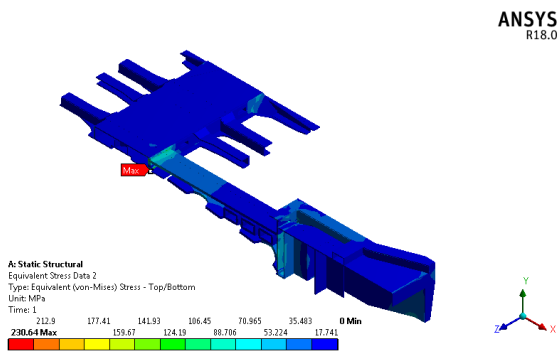
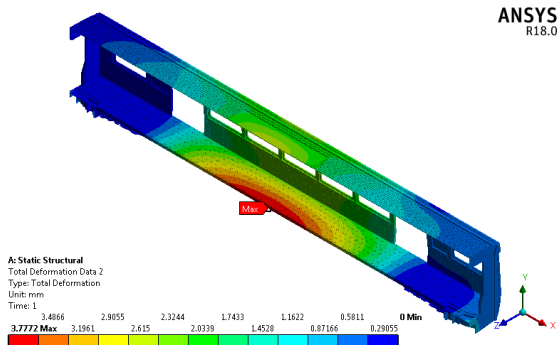


Data 2

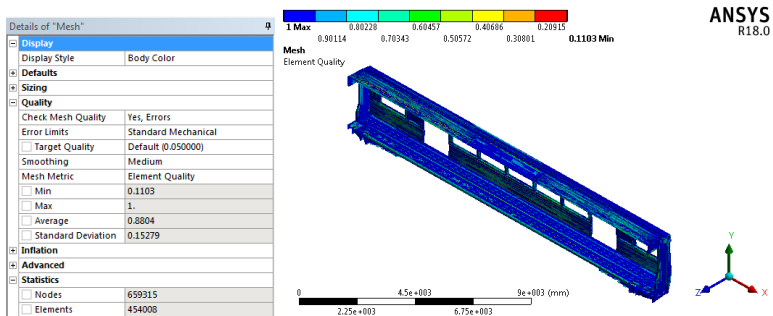


Controls

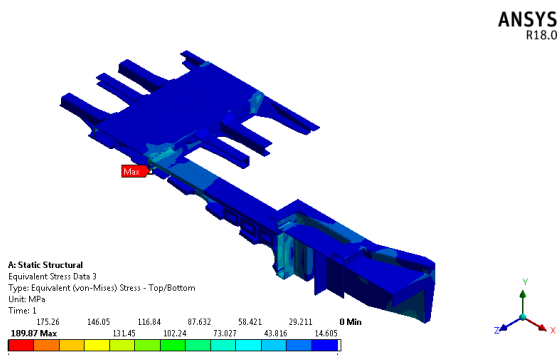
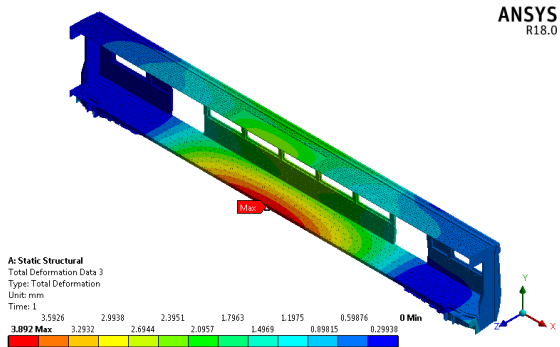
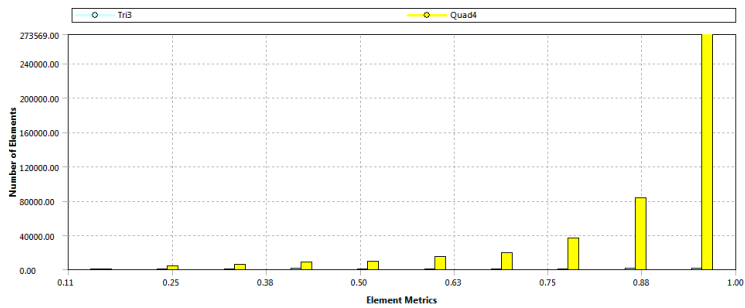


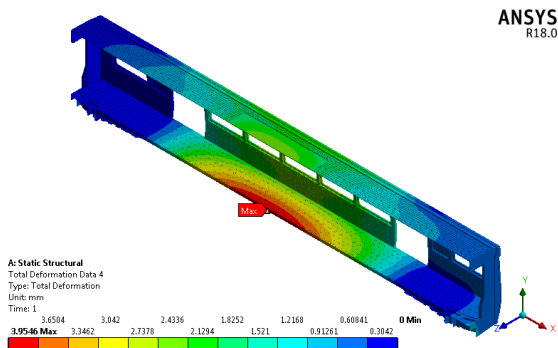
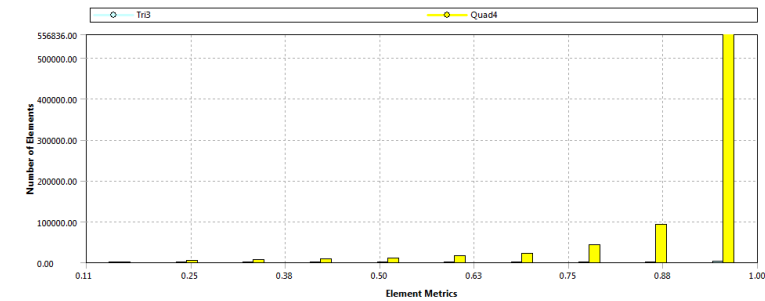
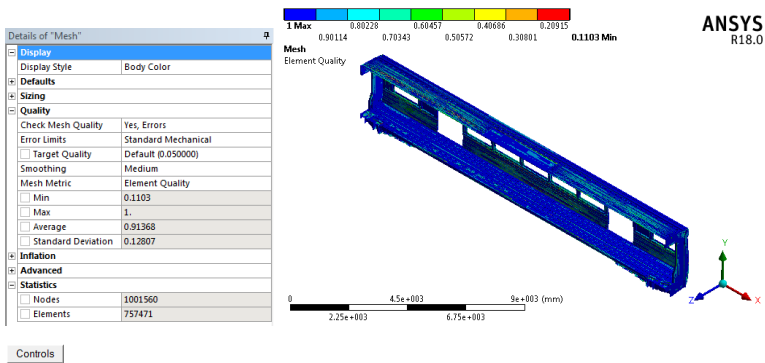


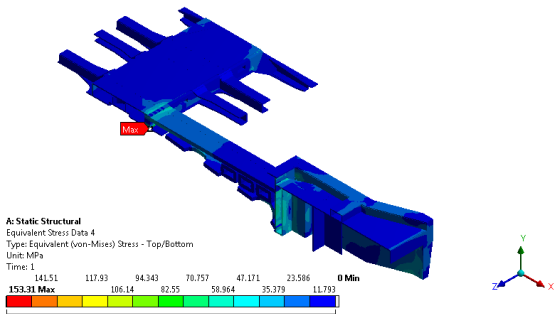
## Data 3



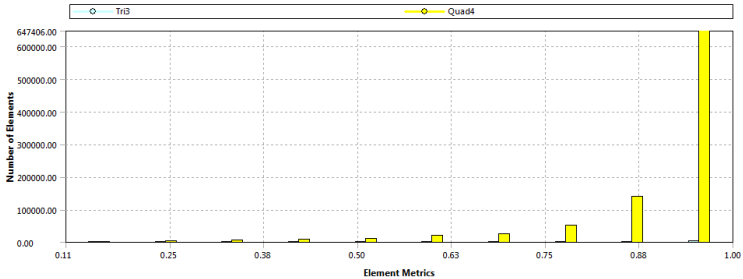
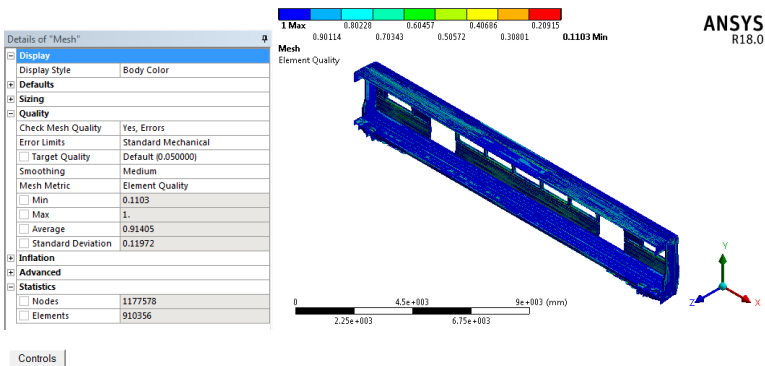
Controls

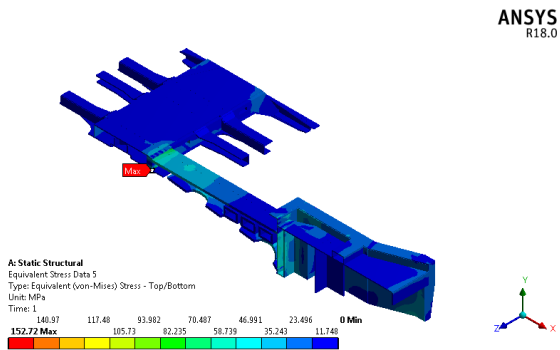
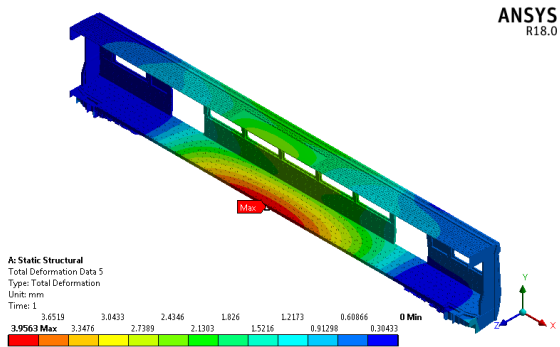




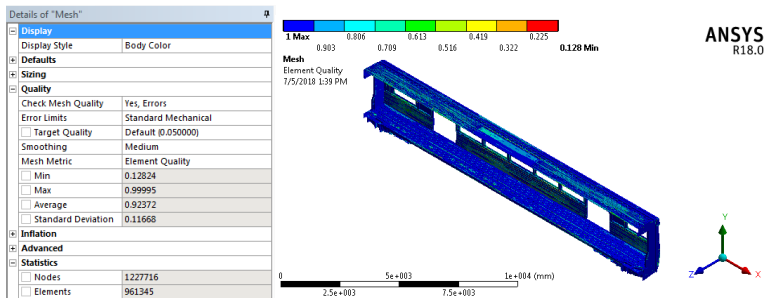


Data 5

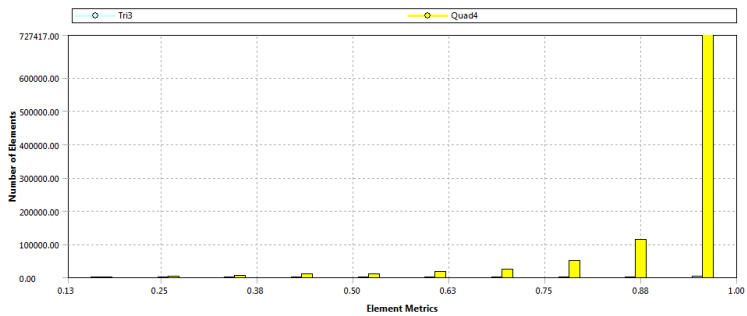




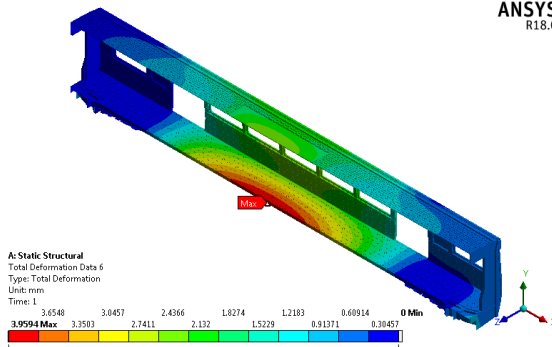
## Data 6



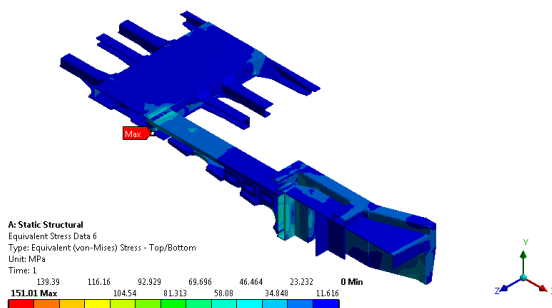
Controls



ANSYS  
R18.0



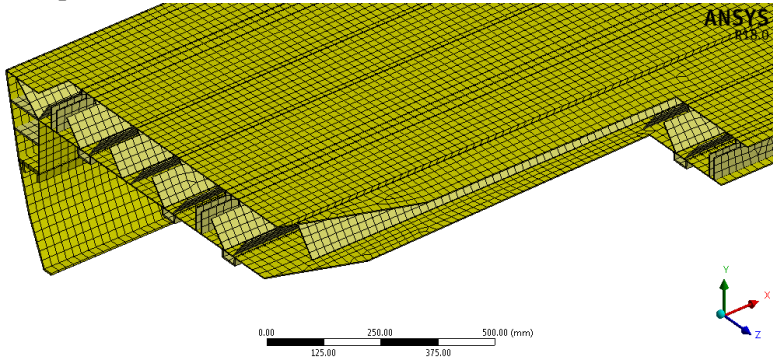
ANSYS  
R18.0



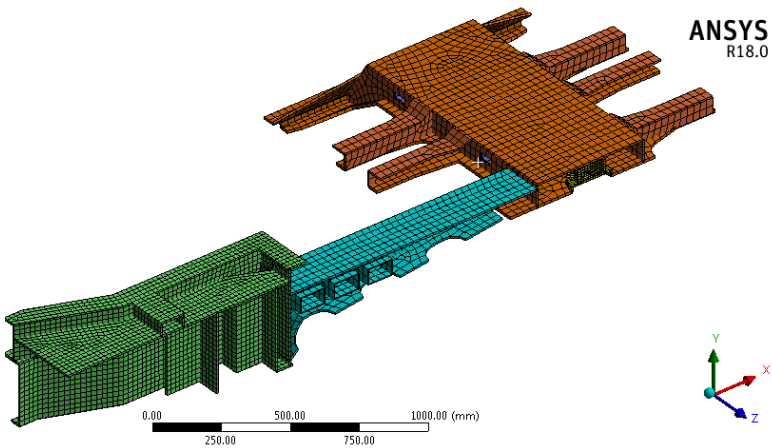


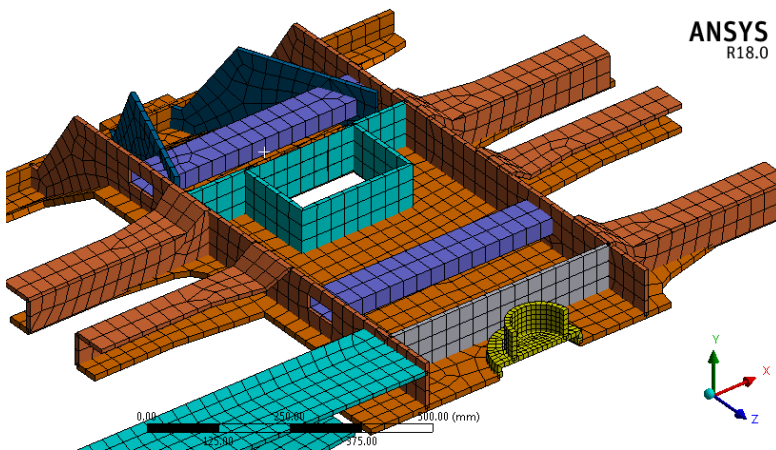
## Lampiran 4 : Detail *Meshing* pada setiap Komponen Utama

### Komponen *Underframe*

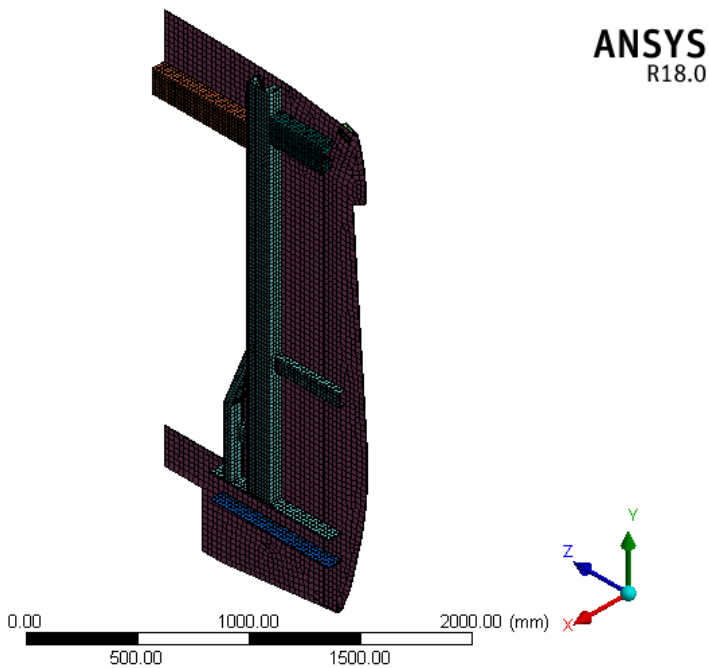


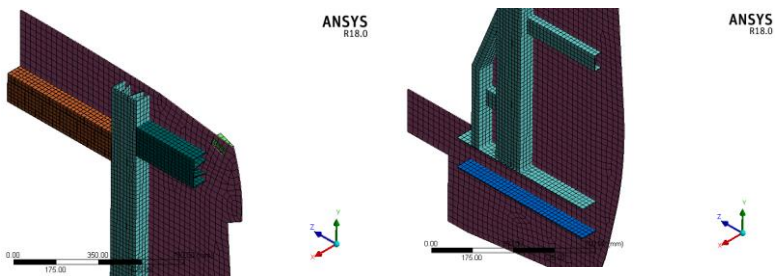
### Komponen *Main Support Beam*



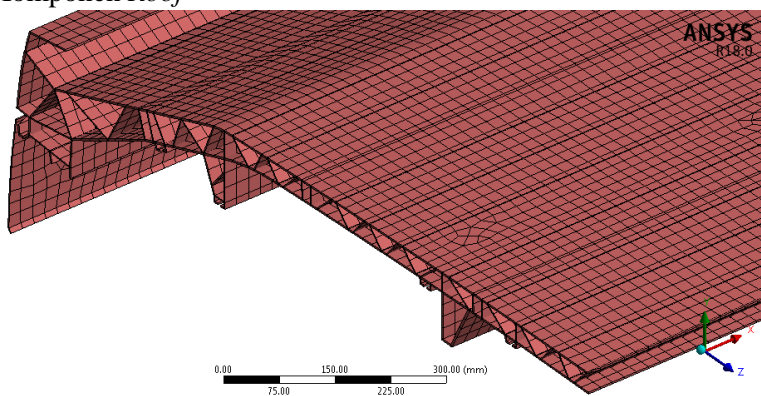


Komponenten *End Wall*

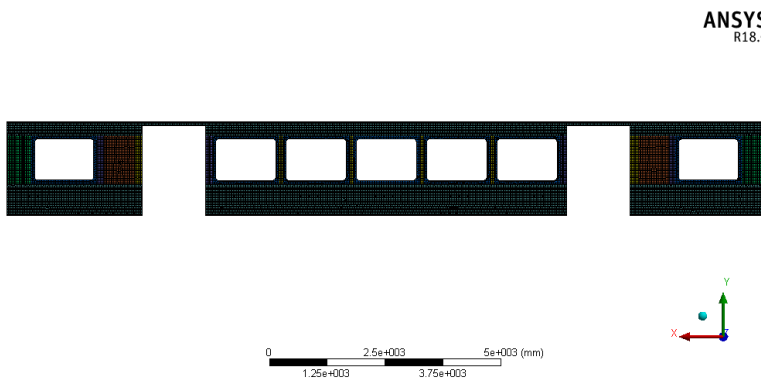


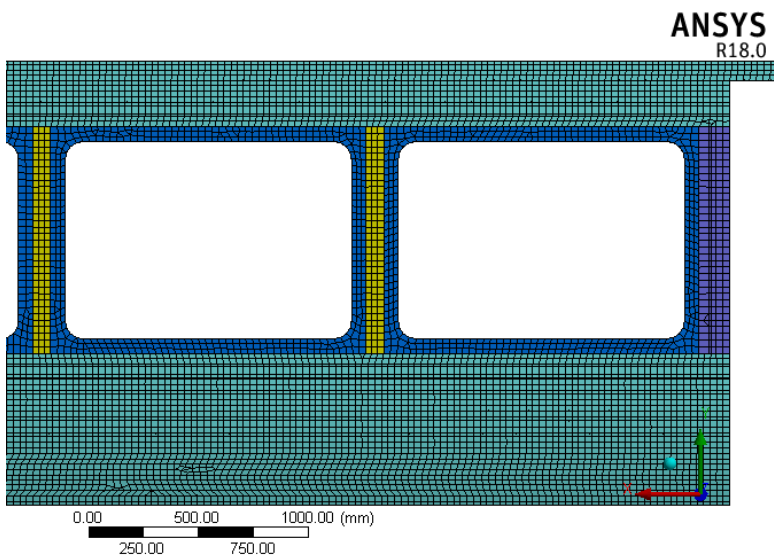
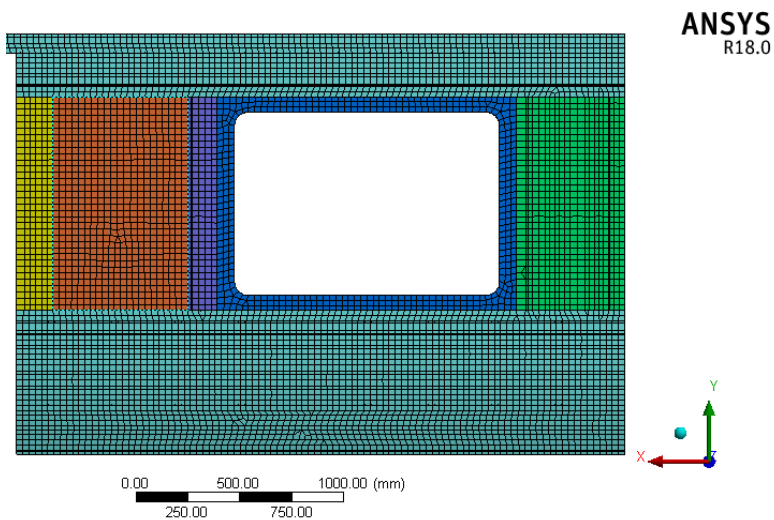


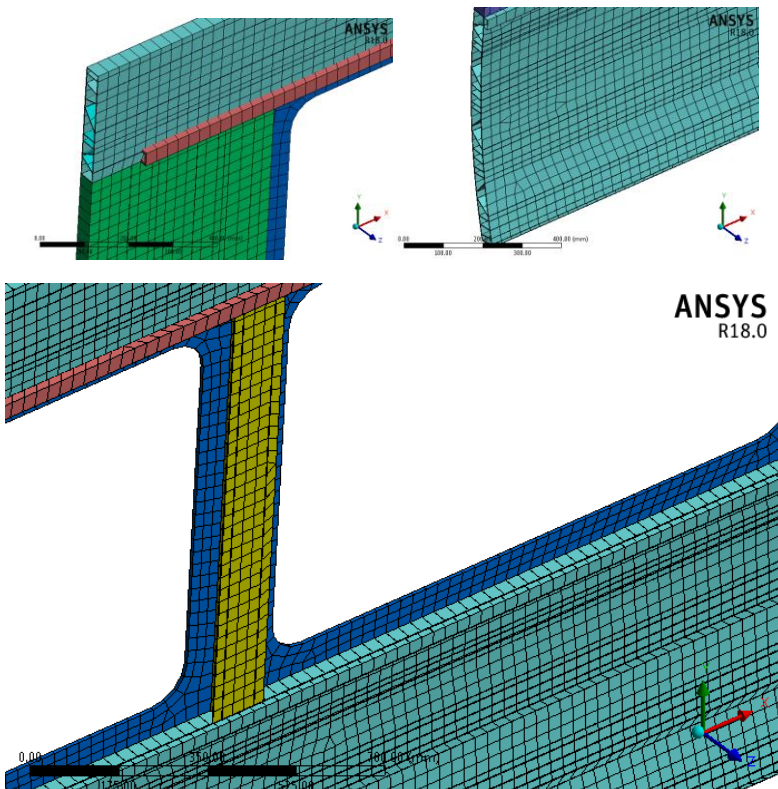
Komponen *Roof*



Komponen *Side Wall*







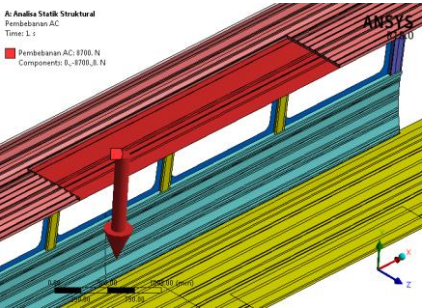
Lampiran 5 : Data Berat Badan Rata-Rata Orang Asia

Table 3 Population, body mass and biomass by world region in 2005 and in hypothetical scenarios

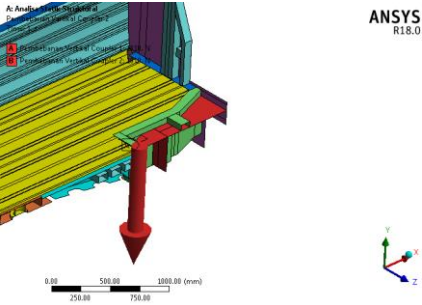
WHO region	Adult population (millions)	Average body mass (kg)	Biomass (million kg)	No of people overweight / total population	Biomass due to BMI > 25 (million kg)
Asia	2815	57.7	162408	24.2%	4265
Europe	606	70.8	42895	55.6%	3836
Africa	535	60.7	32484	28.9%	1464
Latin Am. Caribbean	386	67.9	26231	57.9%	2431
Northern Am.	263	80.7	21185	73.9%	3297
Oceania	24	74.1	1815	63.3%	191
World	4630	62.0	287017	34.7%	15484
Scenario (1): all countries have BMI distribution of Japan	4630	58.8	272408 (-5%)	22.3%	5630 (-64%)
Scenario (2): all countries have BMI distribution of USA	4630	74.6	345426 (+20%)	74.0%	53090 (+243%)

Lampiran 6 : Detail Pembebanan

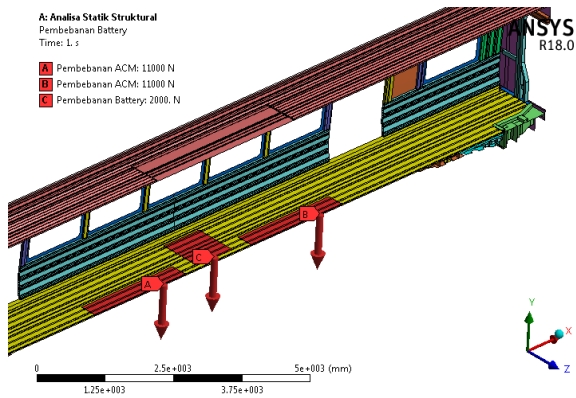
Pembebanan AC



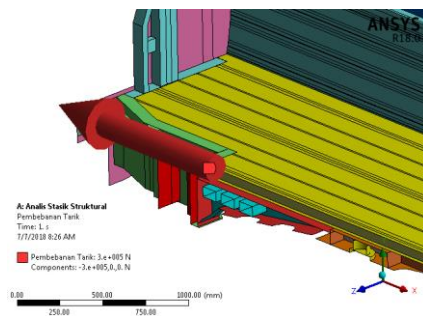
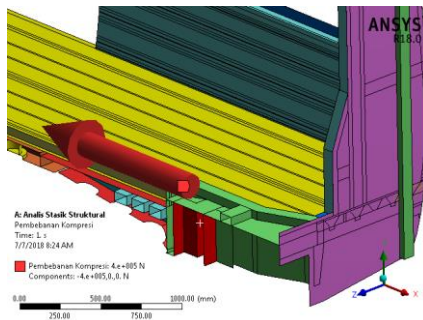
Pembebanan Vertikal pada Coupler



Pembebanan ACM dan Pembebanan Battery



## Pembebanan Kompresi dan Pembebanan Tarik

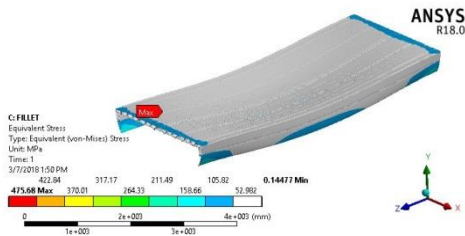


Lampiran 7 : Data Hasil Simulasi Model *Underframe* dengan *Fillet* sebagai perbandingan dalam penentuan Faktor Koreksi Tegangan Konsentrasi

1. Data Simulasi Model *Underframe* menggunakan *Fillet* dengan Pembebanan Vertikal

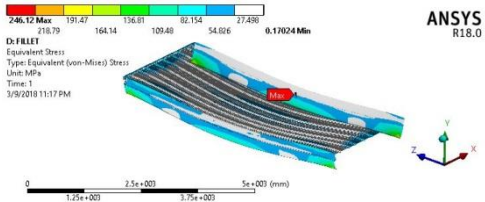
Data 1

Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Element Midside Nodes	Program Co...
Sizing	
Size Function	Adaptive
Relevance Center	Coarse
<input type="checkbox"/> Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Asse...
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Minimum Edge Length	2.88220 mm
Quality	
Inflation	
Advanced	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	492558
<input type="checkbox"/> Elements	245213



Data 2

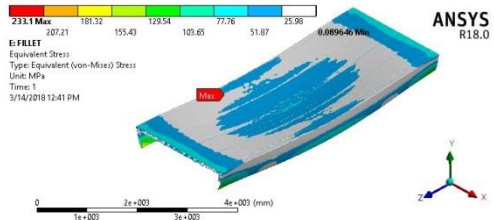
Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Element Midside Nodes	Program Controlled
Sizing	
Size Function	Adaptive
Relevance Center	Coarse
<input type="checkbox"/> Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Automatic Mesh Base...	On
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Minimum Edge Length	2.88220 mm
Quality	
Inflation	
Advanced	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	530952
<input type="checkbox"/> Elements	279347





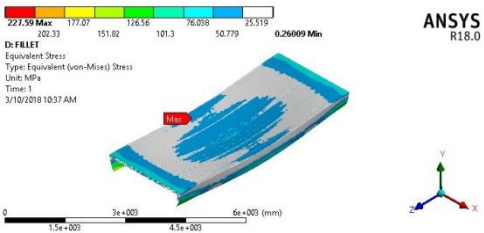
## Data 3

<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Element Midside Nodes	Program Controlled
<b>Sizing</b>	
Size Function	Adaptive
Relevance Center	Coarse
<input type="checkbox"/> Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Automatic Mesh Base...	On
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Minimum Edge Length	2.88220 mm
<b>Quality</b>	
<b>Inflation</b>	
<b>Advanced</b>	
<b>Statistics</b>	
<input type="checkbox"/> Nodes	542764
<input type="checkbox"/> Elements	292465



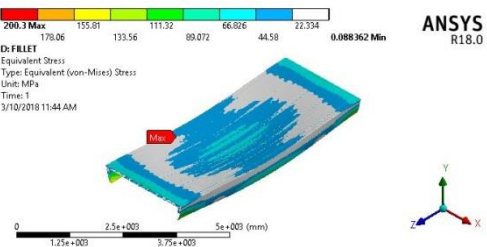
## Data 4

<b>Details of "Mesh"</b>	
<b>Display</b>	
Display Style	Body Color
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Element Midside Nodes	Program Controlled
<b>Sizing</b>	
<b>Quality</b>	
<b>Inflation</b>	
<b>Advanced</b>	
<b>Statistics</b>	
<input type="checkbox"/> Nodes	560838
<input type="checkbox"/> Elements	300705



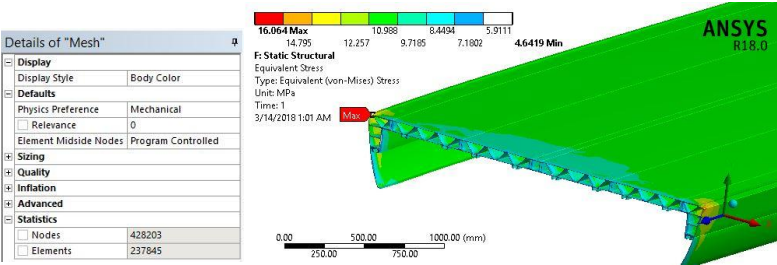
## Data 5

<b>Display</b>	
Display Style	Body Color
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Element Midside Nodes	Program Controlled
<b>Sizing</b>	
Size Function	Adaptive
Relevance Center	Coarse
<input type="checkbox"/> Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Automatic Mesh Based Defeating	On
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Minimum Edge Length	2.88220 mm
<b>Quality</b>	
<b>Inflation</b>	
<b>Advanced</b>	
<b>Statistics</b>	
<input type="checkbox"/> Nodes	708008
<input type="checkbox"/> Elements	380213

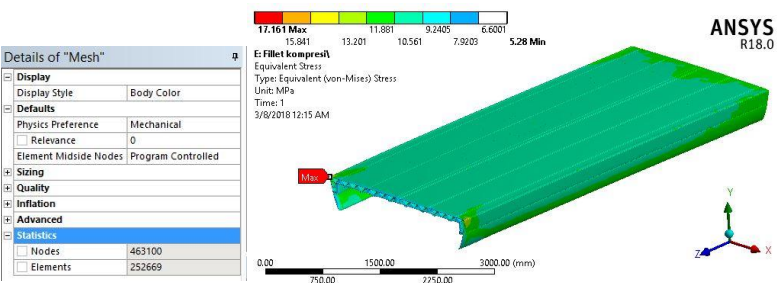


2. Data Simulasi Model *Underframe* menggunakan *Fillet* dengan Pembebanan Kompresi

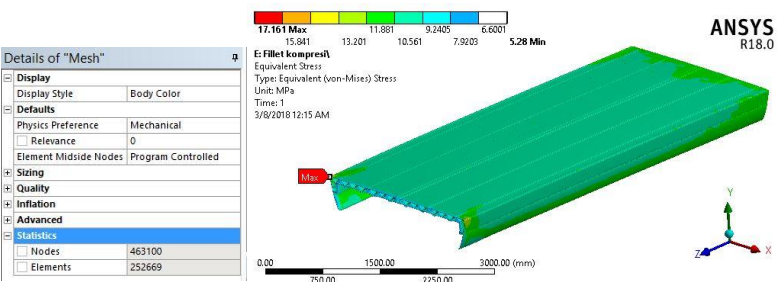
Data 1



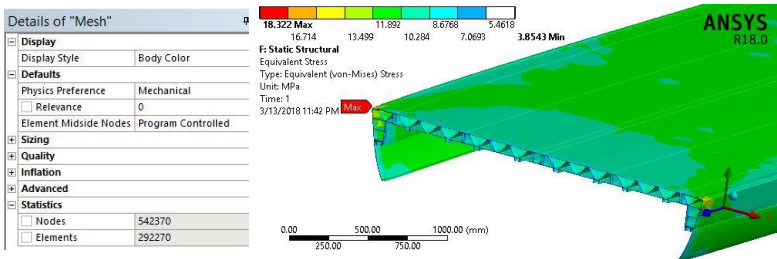
Data 2



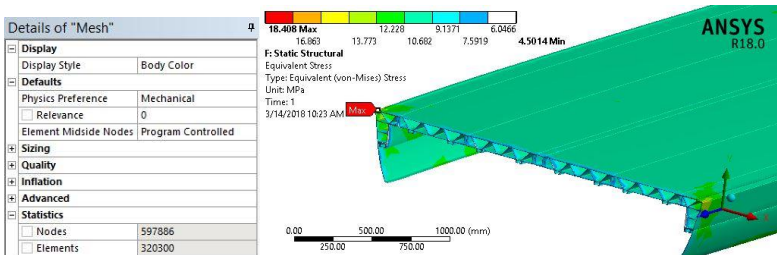
Data 3



## Data 4



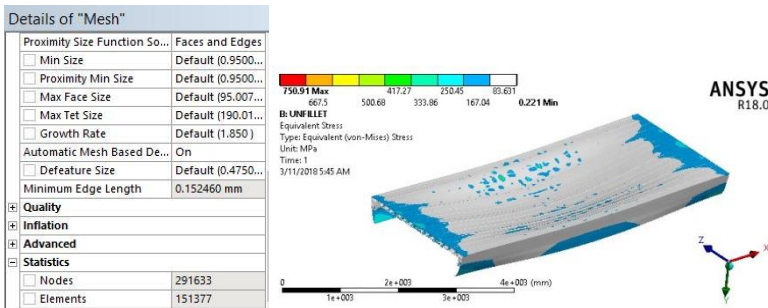
## Data 5



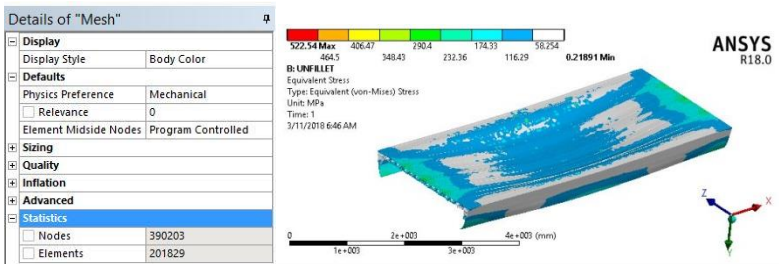
## Lampiran 8 : Data Hasil Simulasi Model *Underframe* tanpa *Fillet* sebagai perbandingan dalam penentuan Faktor Pengali Tegangan Konsentrasi

### 1. Data Simulasi Model *Underframe* tanpa *Fillet* dengan Pembebanan Vertikal

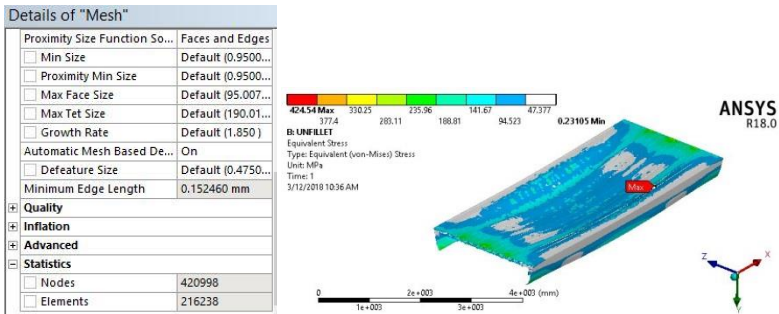
## Data 1



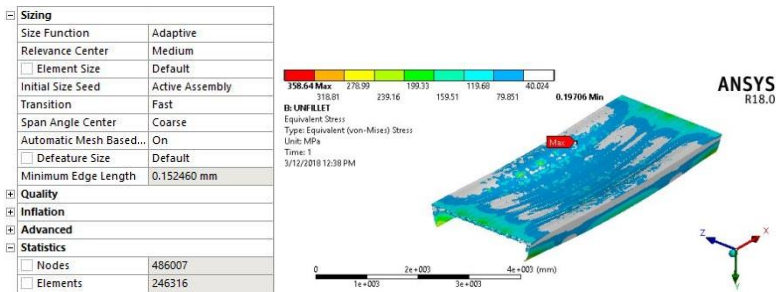
## Data 2



## Data 3

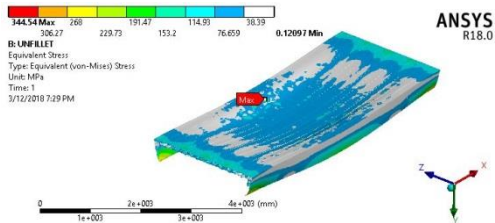


## Data 4



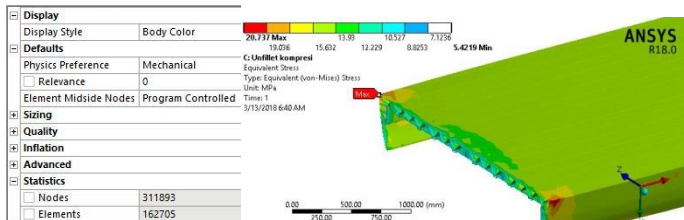
## Data 5

Size Function	Adaptive
Relevance Center	Medium
<input type="checkbox"/> Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Automatic Mesh Based Def...	On
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Minimum Edge Length	0.152460 mm
Quality	
Inflation	
Advanced	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	541728
<input type="checkbox"/> Elements	272039

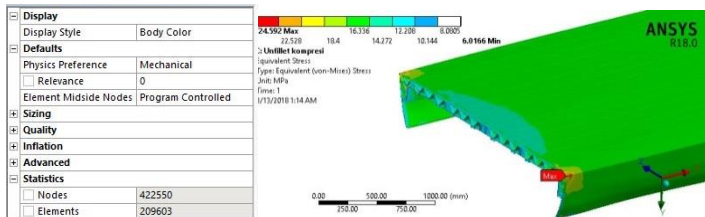


## 2. Data Simulasi Model *Underframe* tanpa *Fillet* dengan Pembebanan Kompresi

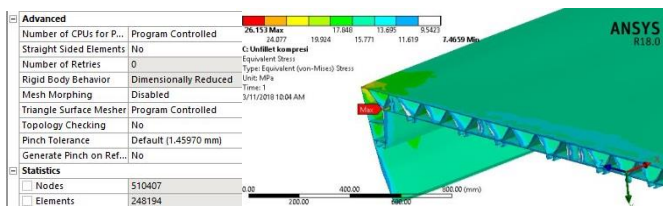
Data 1



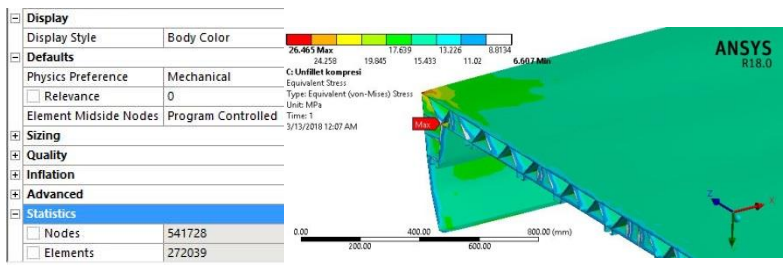
Data 2



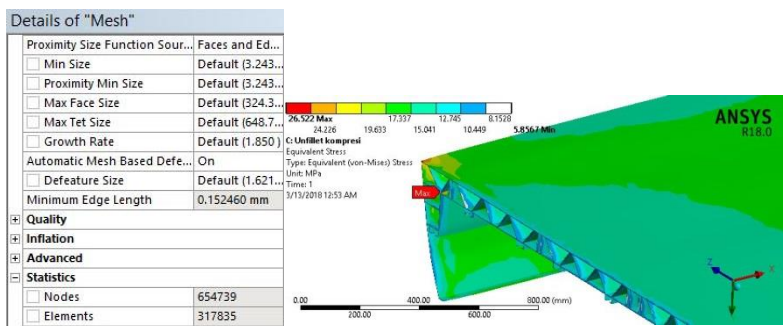
Data 3



Data 4

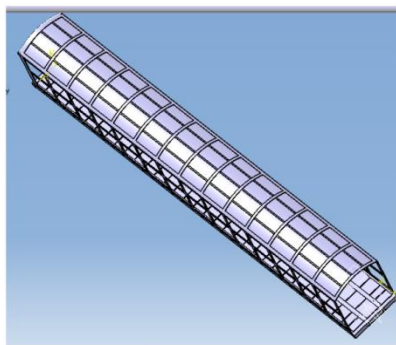


Data 5

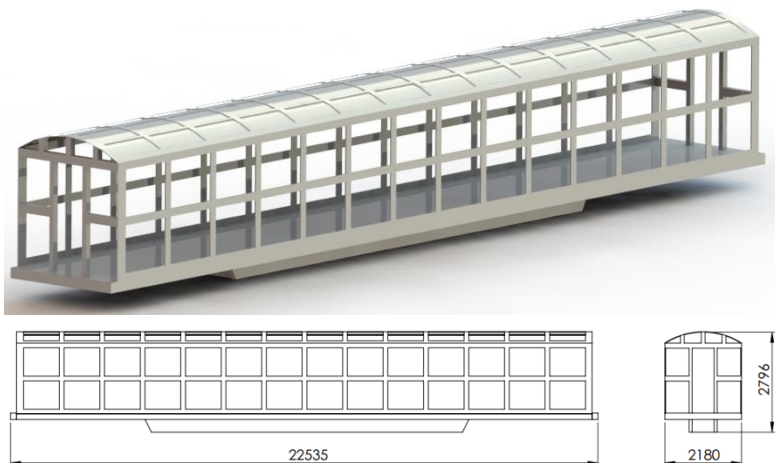


## Lampiran 9 : Perbandingan 3D Model Belete Jirru dengan Penulis

3D Model Belete Jirru



3D Model Penulis



## Lampiran 10 : Kondisi Batas dan Pembebanan

C: Verifikasi Belete Jirru

Tumpuan

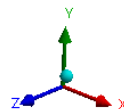
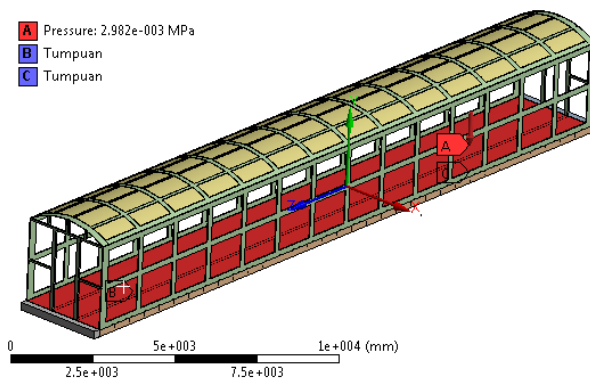
Time: 1. s

**A** Pressure: 2.982e-003 MPa

**B** Tumpuan

**C** Tumpuan

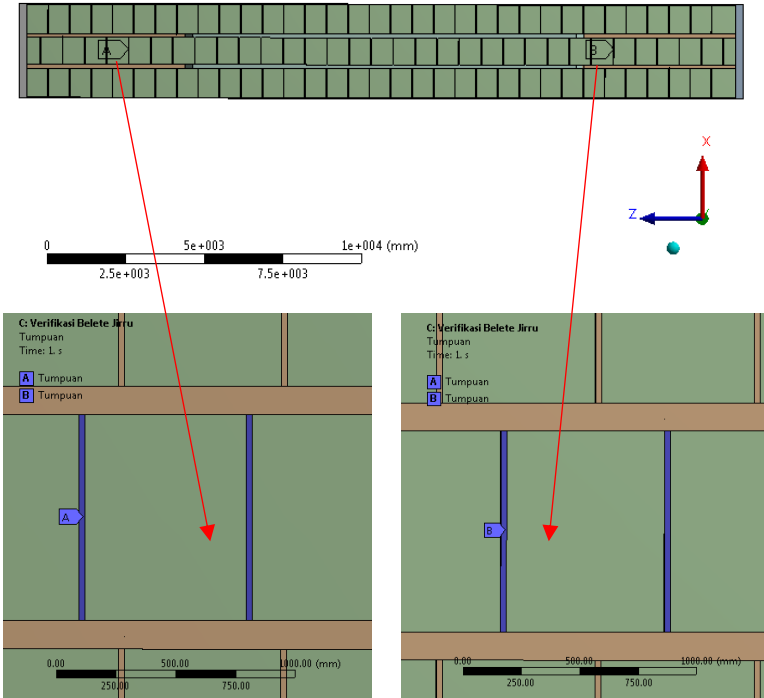
**ANSYS**  
R18.0



C: Verifikasi Belete Jiru  
Tumpuan  
Time: 1. s

ANSYS  
R18.0

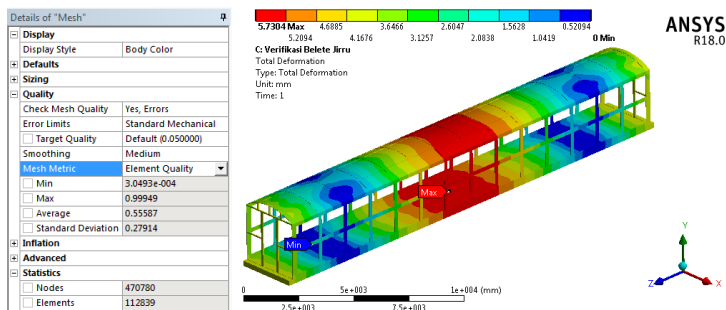
- A Tumpuan
- B Tumpuan



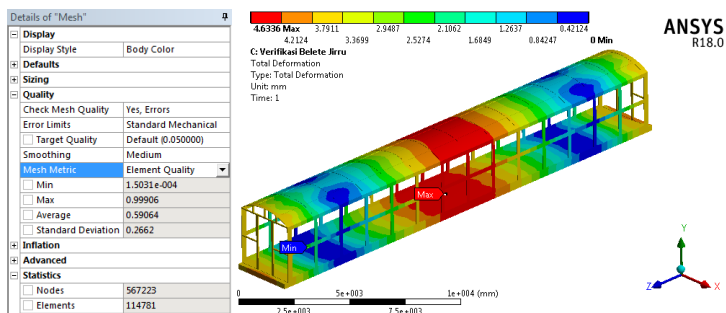


Lampiran 11 : *Mesh Convergent Test* pada Tahap Verifikasi Model Belete Jirru

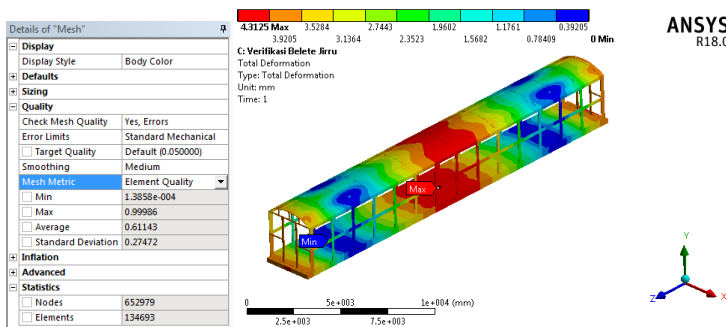
Data 1



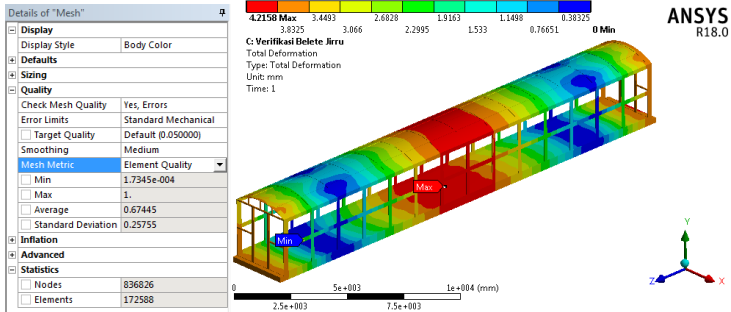
Data 2



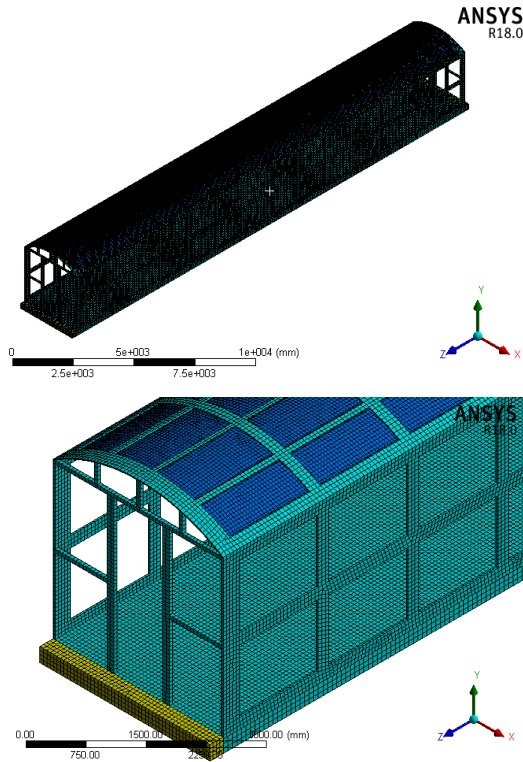
Data 3



Data 4



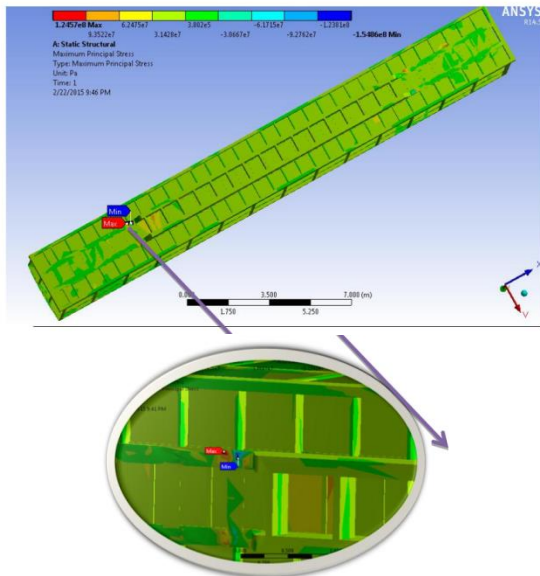
## Lampiran 12 : Hasil *Meshing* pada Model Belete Jirru



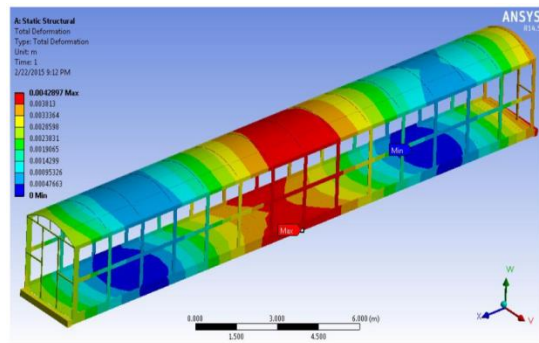
## Lampiran 13 : Perbandingan Hasil Perhitungan Metode Elemen Hingga pada Model Belete Jirru

### 1. Hasil Analisis Belete Jirru

#### Hasil Tegangan Prinsipal Maksimum

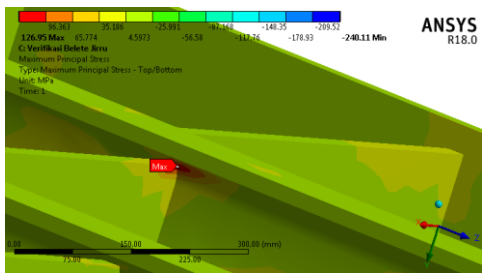
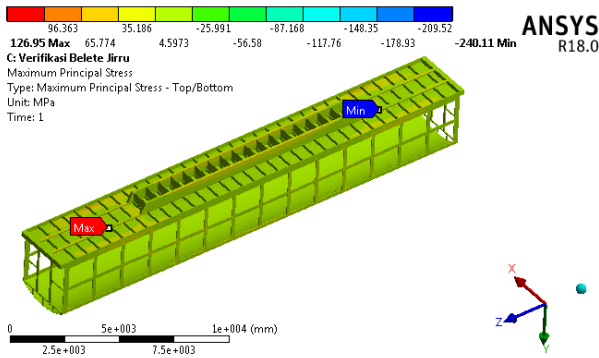


#### Hasil Deformasi Total

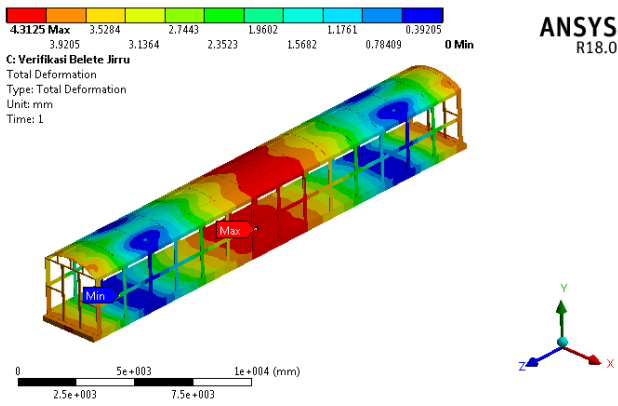


2. Hasil Analisis Penulis

Hasil Tegangan Prinsipal Maksimum

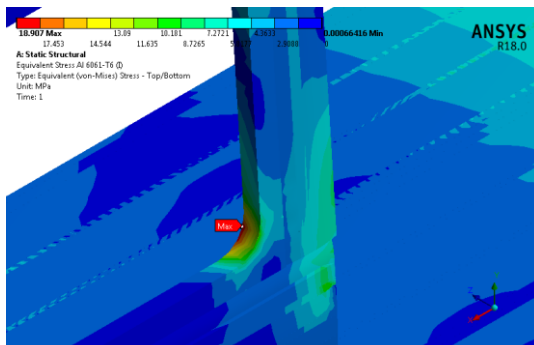
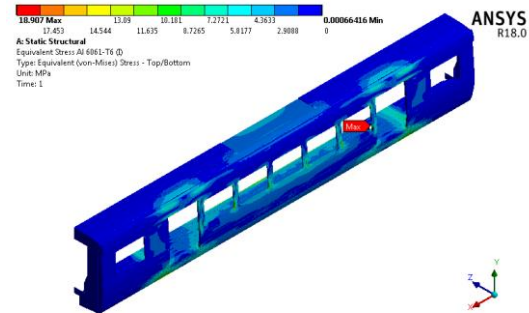


Hasil Deformasi Total

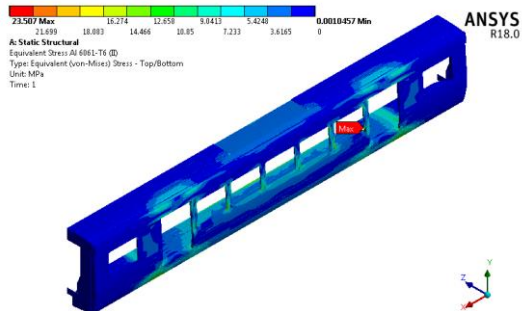


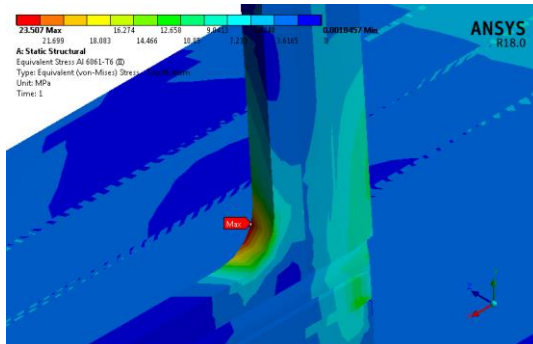
## Lampiran 14 : Hasil Tegangan Von Mises Maksimum pada Material Al 6061-T6

### Kasus Pembebanan I

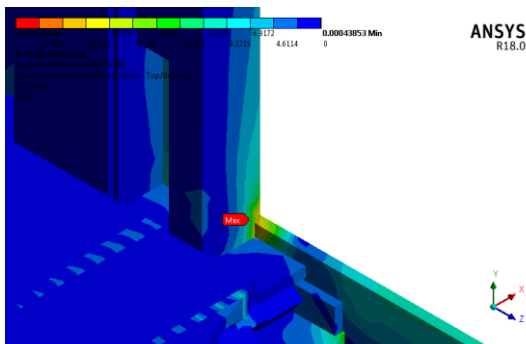
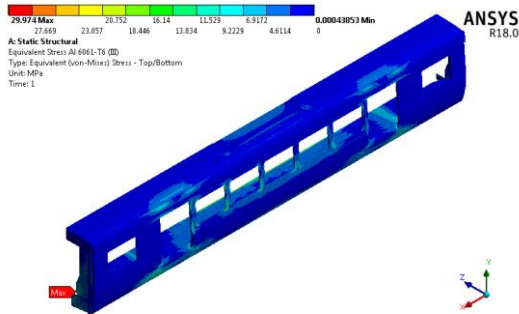


### Kasus Pembebanan II

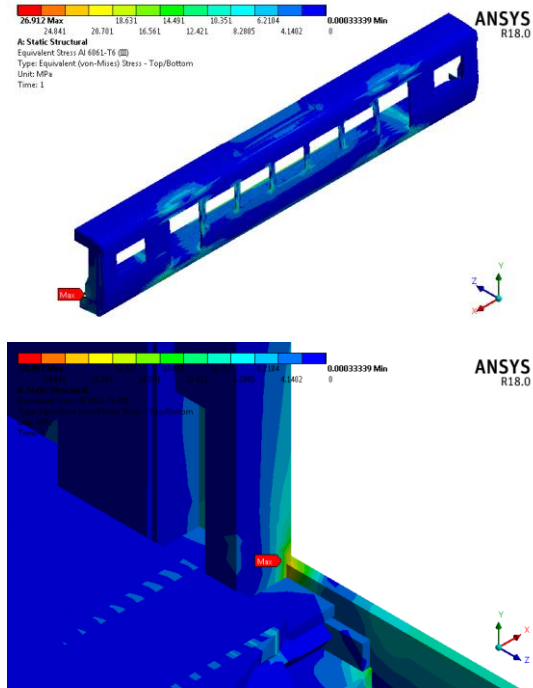




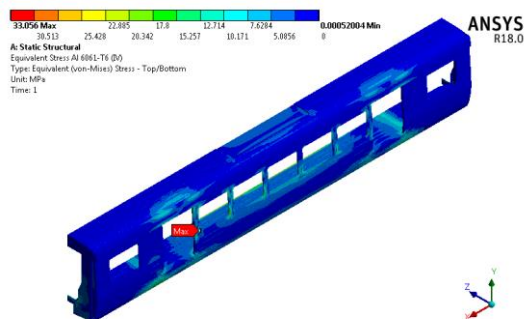
### Kasus Pembebanan III (Pembebanan Standarisasi)

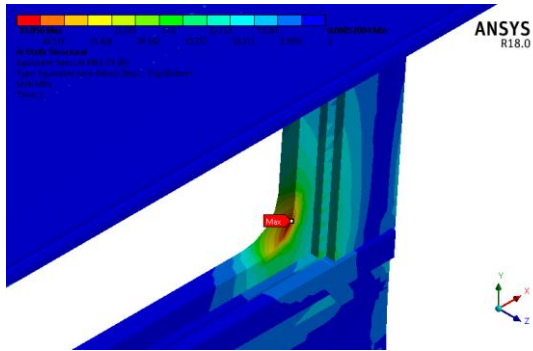


### Kasus Pembebanan III (Pembebanan Aktual)

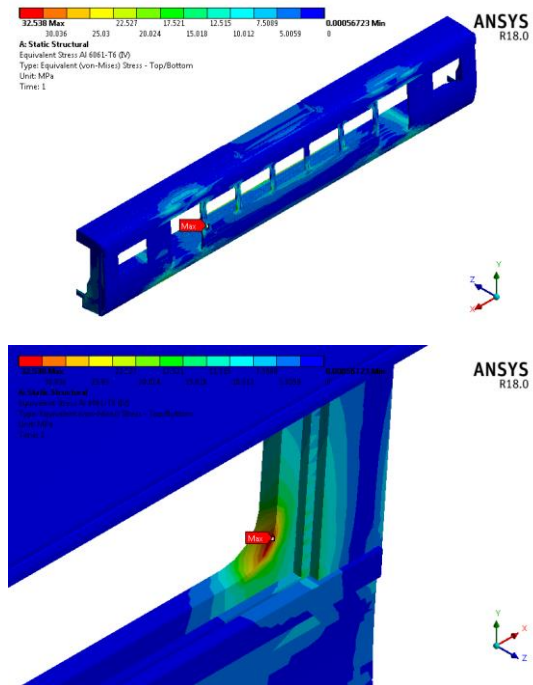


## Kasus Pembebanan IV (Pembebanan Standarisasi)





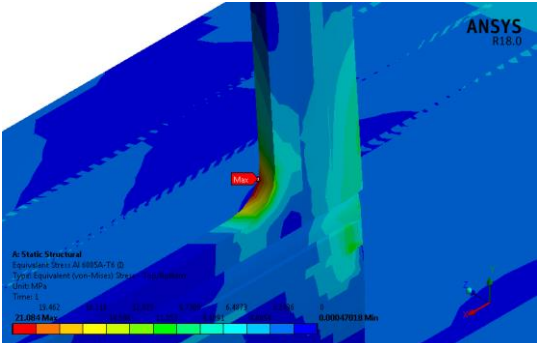
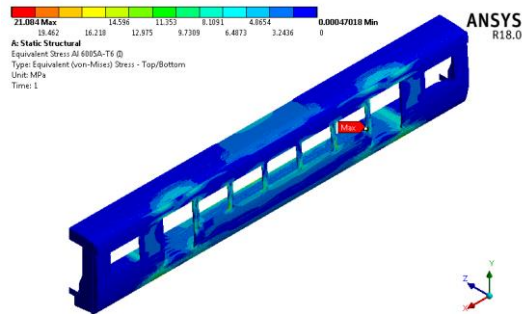
## Kasus Pembebanan IV (Pembebanan Aktual)



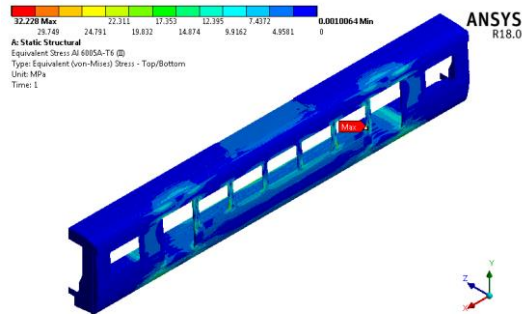


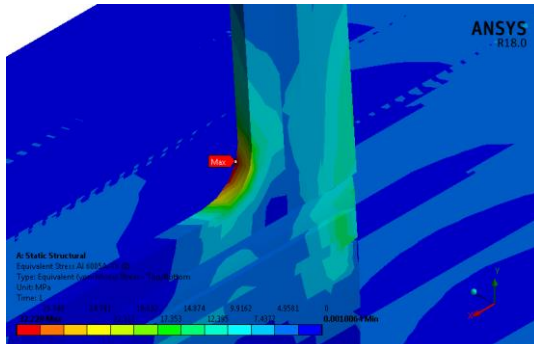
**Lampiran 15 : Hasil Tegangan Von Mises Maksimum pada Material Al 6005A-T6**

**Kasus Pembebanan I**

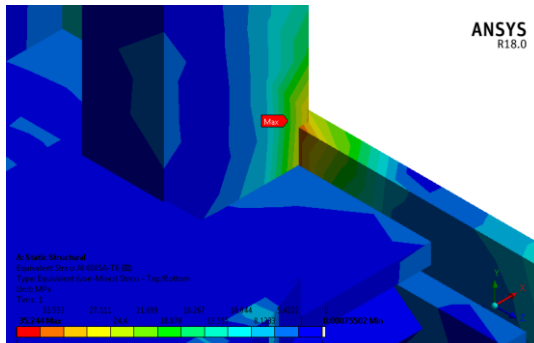
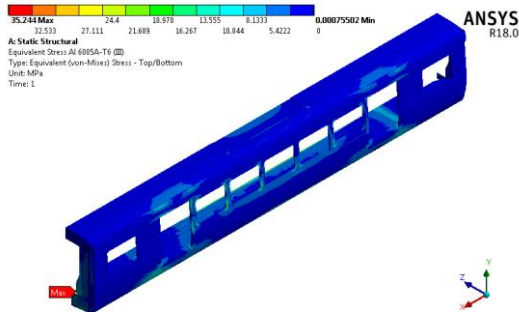


**Kasus Pembebanan II**

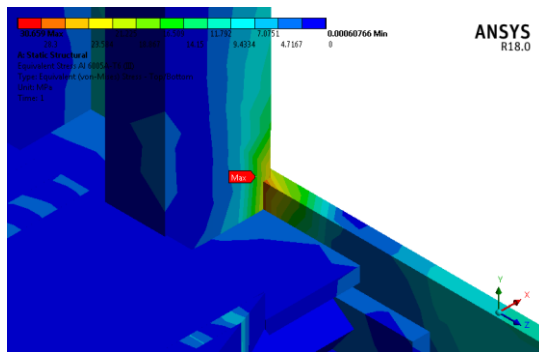
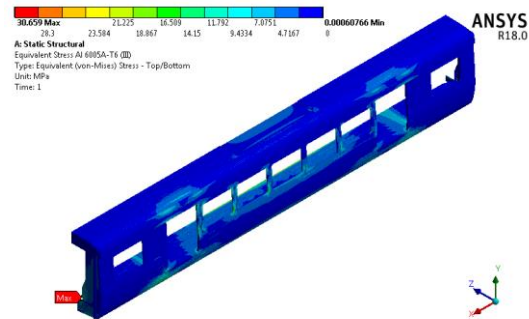




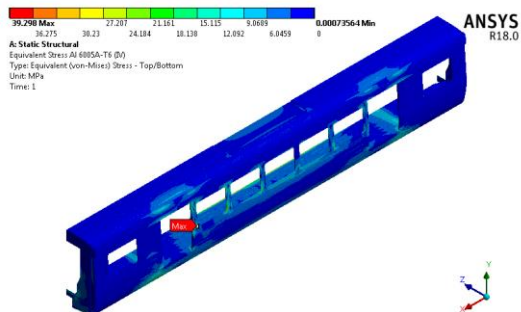
### Kasus Pembebanan III (Pembebanan Standarisasi)

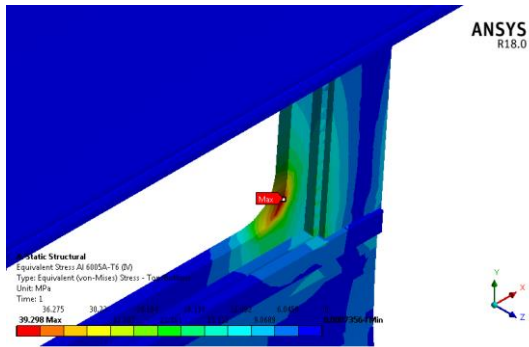


## Kasus Pembebanan III (Pembebanan Aktual)

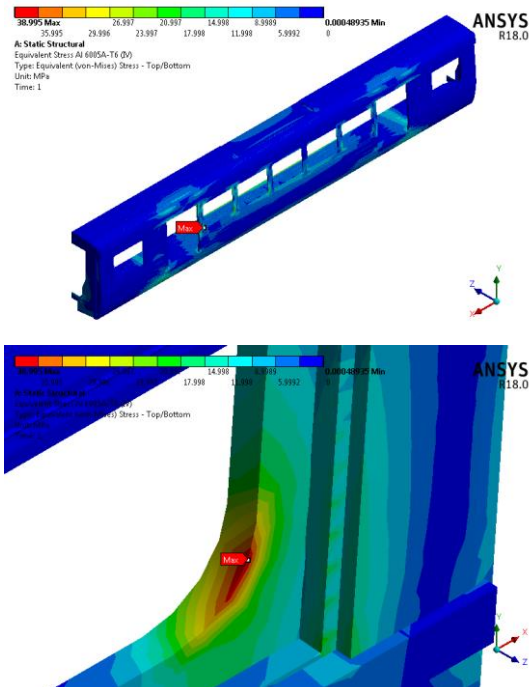


## Kasus Pembebanan IV (Pembebanan Standarisasi)

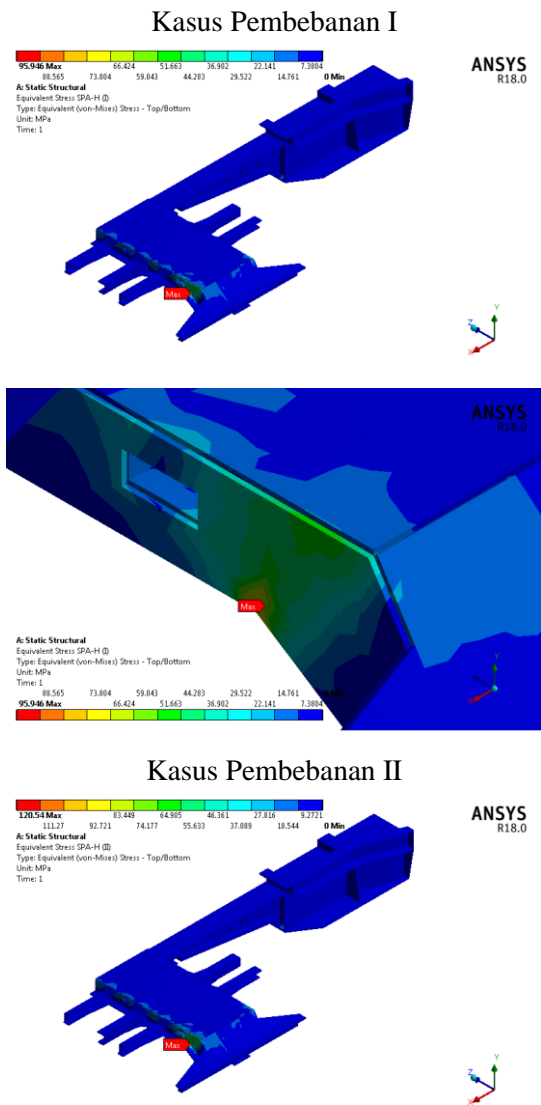


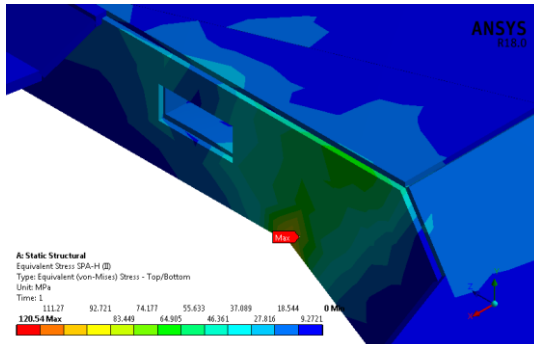


## Kasus Pembebanan IV (Pembebanan Aktual)

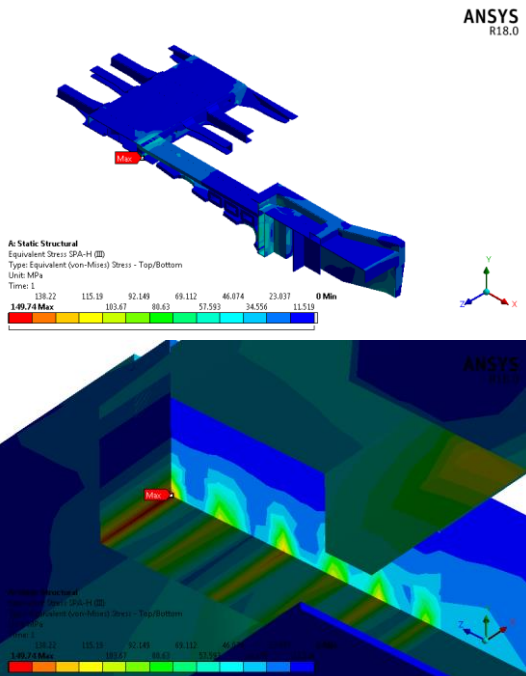


**Lampiran 16 : Hasil Tegangan Von Mises Maksimum pada Material SPA-H JIS G 3125**



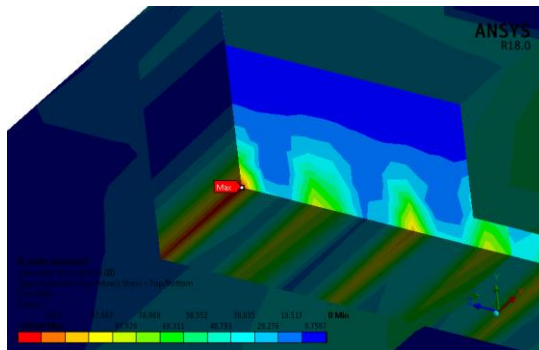
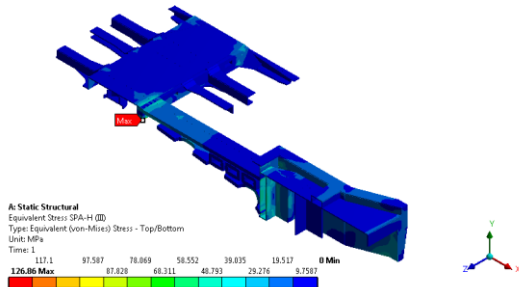


### Kasus Pembebanan III (Pembebanan Standarisasi)



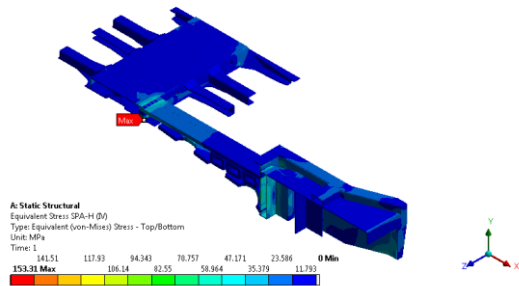
### Kasus Pembebanan III (Pembebanan Aktual)

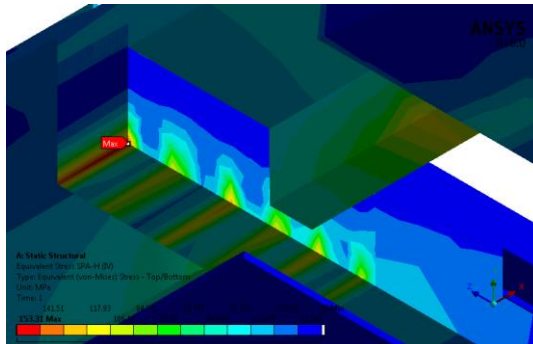
ANSYS  
R18.0



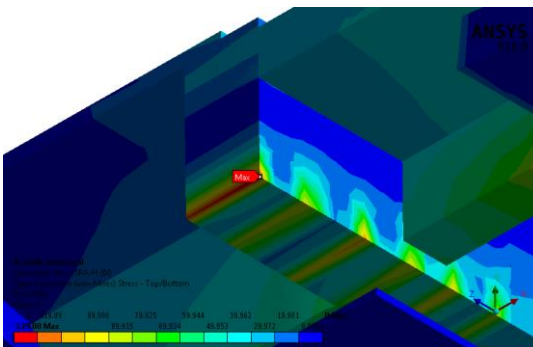
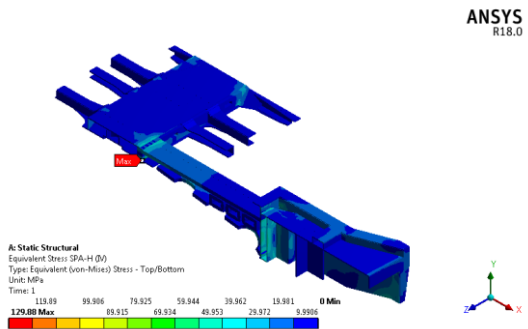
## Kasus Pembebanan IV (Pembebanan Standarisasi)

ANSYS  
R18.0



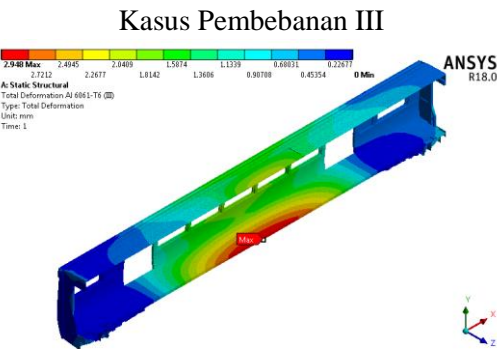
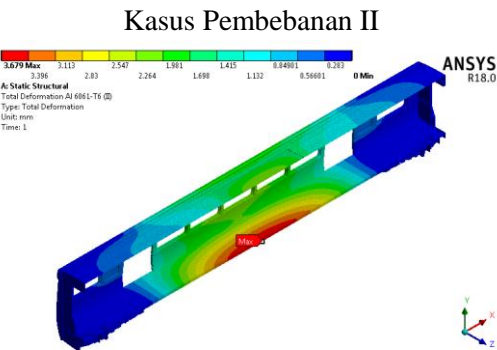
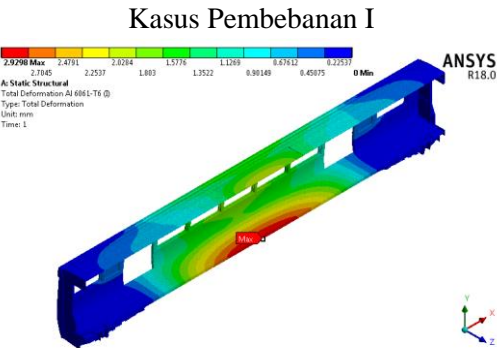


## Kasus Pembebanan IV (Pembebanan Aktual)

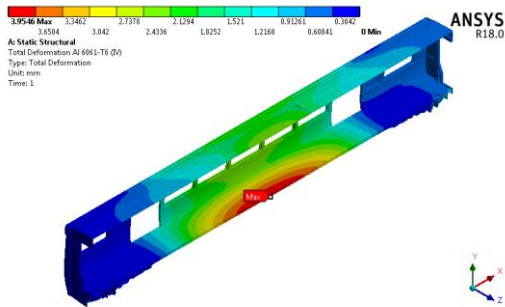




**Lampiran 17 : Hasil Deformasi Total Maksimum pada Material Al 6061-T6**

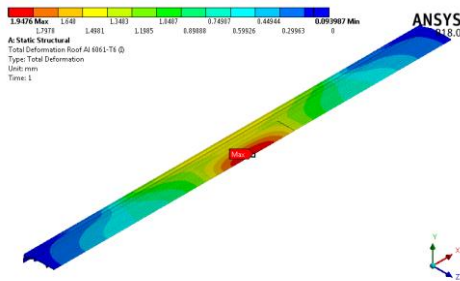


## Kasus Pembebanan IV

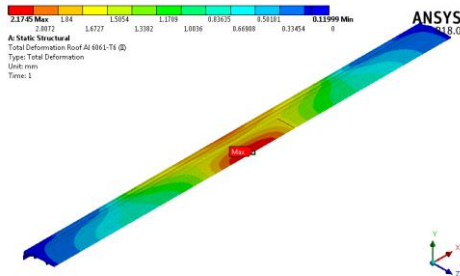


## Lampiran 18 : Hasil Deformasi Total Maksimum pada Komponen *Roof* (Material Al 6061-T6)

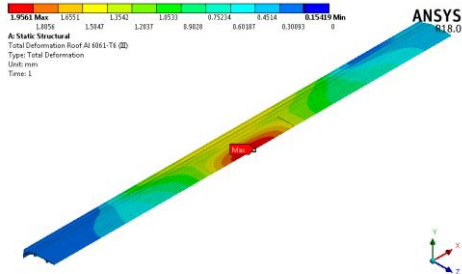
### Kasus Pembebanan I



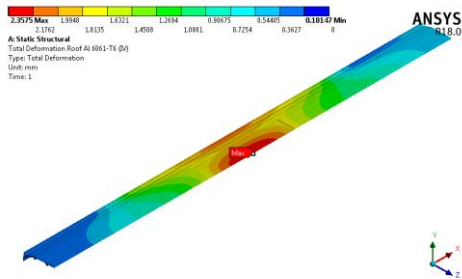
### Kasus Pembebanan II



### Kasus Pembebanan III

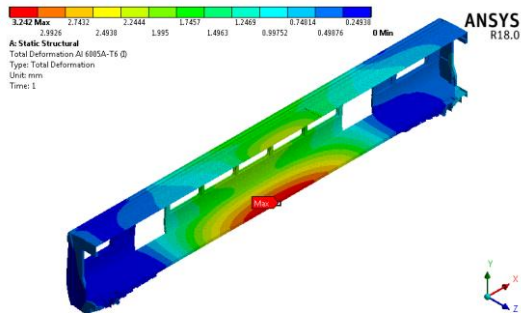


### Kasus Pembebanan IV

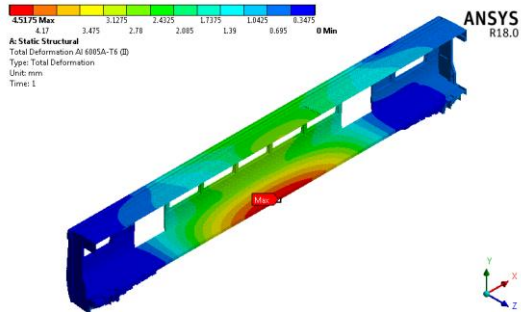


## Lampiran 19 : Hasil Deformasi Total Maksimum pada Material Al 6005A-T6

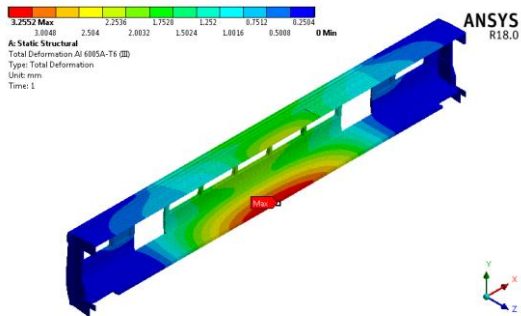
### Kasus Pembebanan I



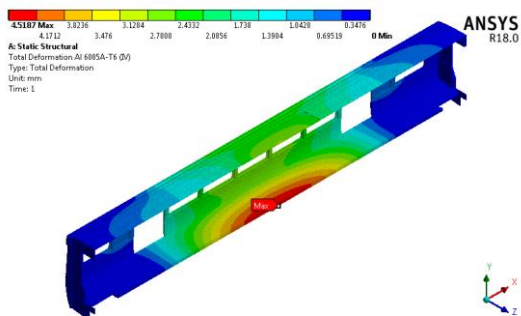
### Kasus Pembebanan II



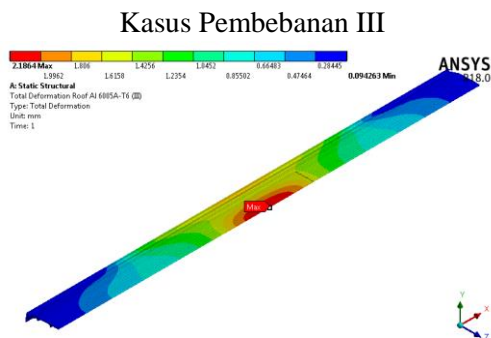
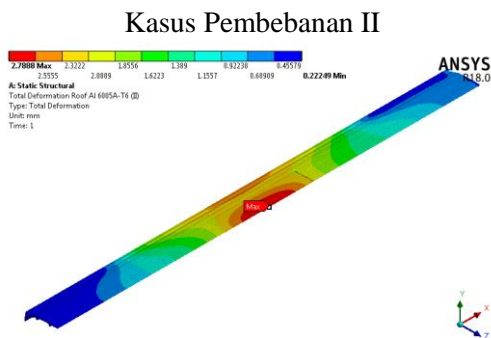
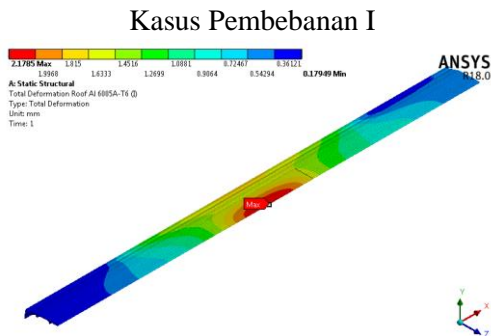
### Kasus Pembebanan III



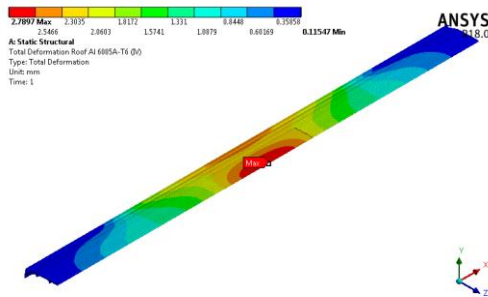
### Kasus Pembebanan IV



**Lampiran 20 : Hasil Deformasi Total Maksimum pada  
Komponen *Roof* (Material Al 6005A-T6)**



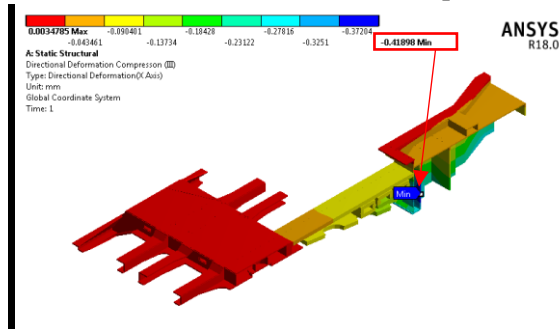
## Kasus Pembebanan IV



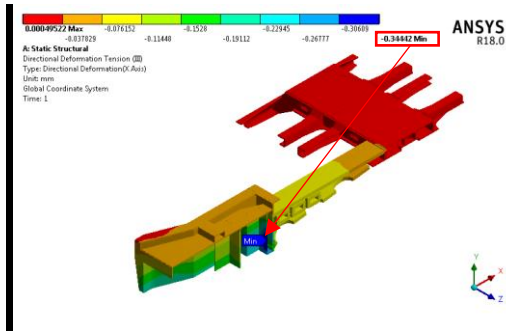
## Lampiran 21 : Hasil Deformasi Arah terhadap Sumbu X Maksimum pada komponen *Main Support Beam* (Material SPA-H JIS G 3125)

- Kasus Pembebanan III
  - Pembebanan Kompresi dan Tarikan sesuai dengan Standarisasi

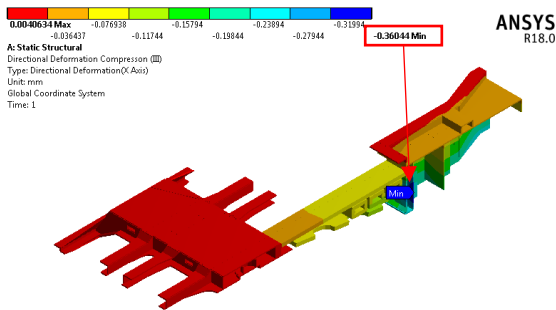
### Deformasi Akibat Pembebanan Kompresi



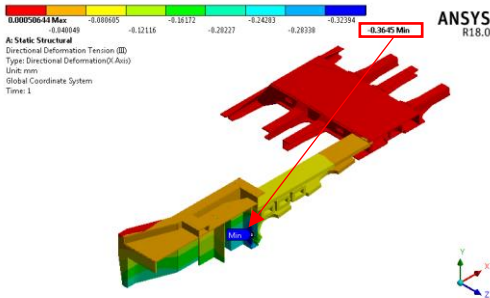
### Deformasi Akibat Pembebanan Tarik



- Pembebanan Kompresi dan Tarikan sesuai dengan Perhitungan Aktual  
Deformasi Akibat Pembebanan Kompresi



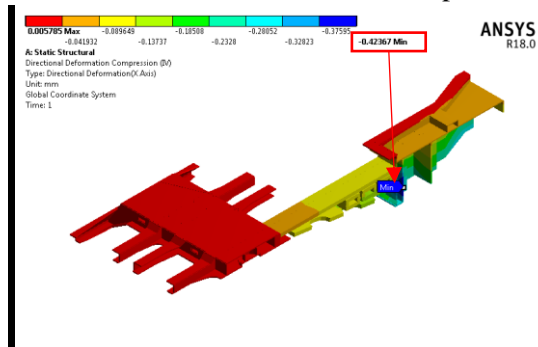
### Deformasi Akibat Pembebanan Tarik



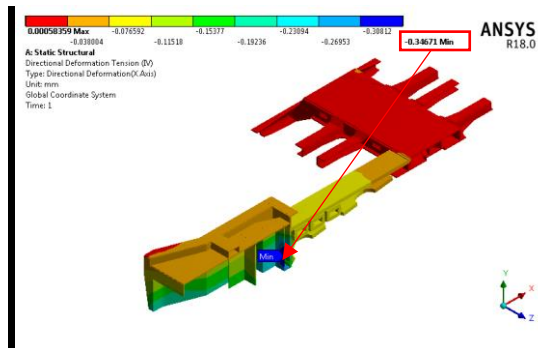
- Kasus Pembebanan IV

- Pembebanan Kompresi dan Tarikan sesuai dengan Standarisasi

### Deformasi Akibat Pembebanan Kompresi

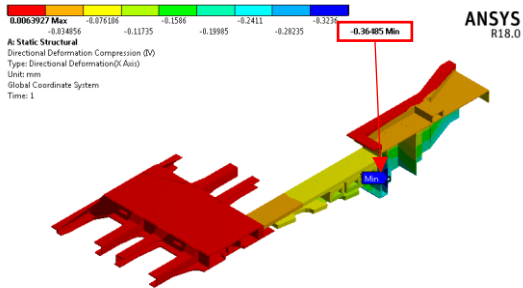


### Deformasi Akibat Pembebanan Tarik

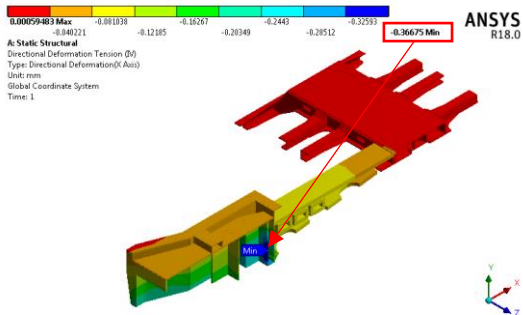




- Pembebanan Kompresi dan Tarikan sesuai dengan Perhitungan Aktual  
Deformasi Akibat Pembebanan Kompresi



## Deformasi Akibat Pembebanan Tarik



*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*

## BIODATA PENULIS



Egy Meirarizka Nurfadillah merupakan nama lengkap dari penulis tugas akhir ini. Penulis yang lahir di Kuningan pada 29 Mei 1996 ini merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Junarman dan Ibu Oti Rochmaeti. Penulis memulai pendidikan formal di TK Nurul Hidayah kemudian melanjutkan ke SDN 1 Cileuleuy hingga kelas 2 SD, dan melanjutkan kembali di SDN 2 Cigugur hingga lulus. Setelah lulus SD

pada tahun 2008 penulis melanjutkan ke SMP ITUS Jalaksana Kuningan dan kemudian melanjutkan ke SMA Negeri 2 Kuningan pada tahun 2011. Setelah menyelesaikan studi tingkat menengah atas, penulis menempuh pendidikan di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya melalui jalur SBMPTN pada tahun 2014 dengan NRP 02111440000123. Penulis mengambil bidang studi Desain khususnya pada laboratirum Mekanika Benda Padat.

Selama menempuh perkuliahan, penulis juga aktif ikut serta dalam berbagai kegiatan dan organisasi. Tahun 2015-2016 penulis menjabat sebagai Staf Departemen Syiar JMMI, Staf Departemen Syiar Ash-Shaff, dan Anggota Kepemanduan Merah Mesin, kemudian pada tahun 2016-2017 penulis menjabat sebagai Kepala Departemen Syiar Ash-Shaff, dan pada tahun 2017-2018 penulis menjabat sebagai Staf *Frame and Body* ITS Team Sapuangan. Penulis juga merupakan Asisten Laboratorium Perancangan dan Pengembangan Produk, Asisten Laboratorium Perpindahan Panas, serta Asisten Laboratorium Mekanika Fluida. Prestasi juara 1 Lomba Nasional Tahunan Rancang Bangun Mesin 2017 menjadi kebanggaan tersendiri bagi penulis.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*